

**ANALISIS DISTRIBUSI TEGANGAN *MONOCOQUE CHASSIS* PADA
MOBIL HEMAT ENERGI DENGAN MATERIAL *CARBON FIBER*
*HONEYCOMB CORE***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



PANGESTU PURNA ILHAMI
NIM. 145060201111051

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS DISTRIBUSI TEGANGAN *MONOCOQUE CHASSIS* PADA
MOBIL HEMAT ENERGI DENGAN MATERIAL *CARBON FIBER*
*HONEYCOMB CORE***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



PANGESTU PURNA ILHAMI
NIM. 145060201111051

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 6 Juli 2018

DOSEN PEMBIMBING I

DOSEN PEMBIMBING II

Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
NIP 19720817 200003 1 001

Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng
NIP 19831023 201504 2 002

Mengetahui,
KETUA PROGRAM STUDI S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

**ANALISIS DISTRIBUSI TEGANGAN *MONOCOQUE CHASSIS* PADA MOBIL
HEMAT ENERGI DENGAN MATERIAL *CARBON FIBER HONEYCOMB CORE***

Nama Mahasiswa : Pangestu Purna Ilhami
NIM : 145060201111051
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konstruksi

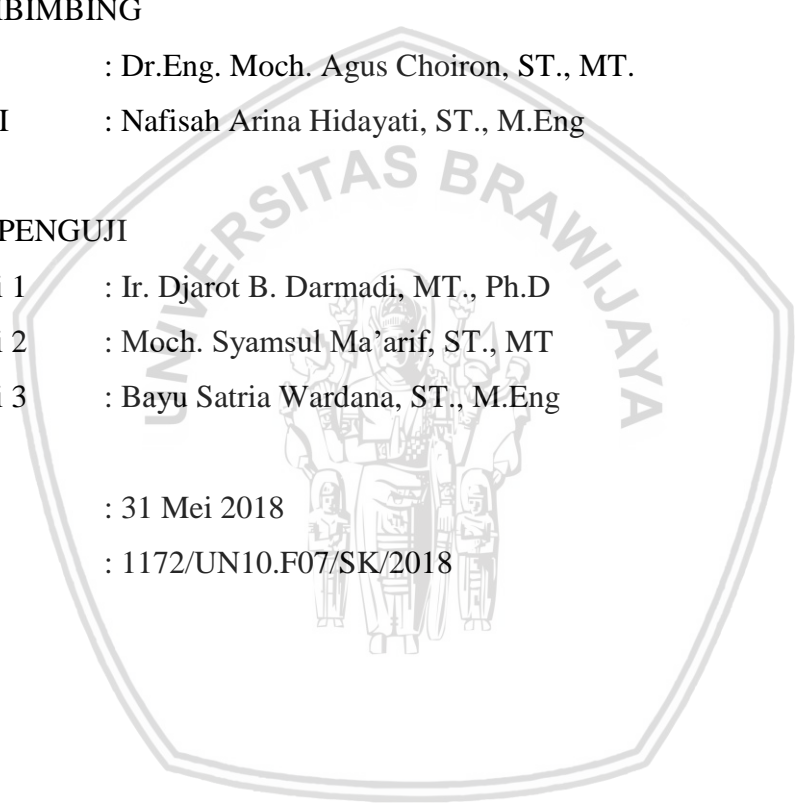
KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
Pembimbing II : Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
Dosen Penguji 2 : Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT
Dosen Penguji 3 : Bayu Satria Wardana, ST., M.Eng

Tanggal Ujian : 31 Mei 2018
SK Penguji : 1172/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang sepengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelurusan berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak pernah terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 4 Juni 2018

Mahasiswa,



Pangestu Purna Ilhami
NIM. 145060201111051



*Tulisan hasil perjuangan ini
dipersembahkan untuk :*

*Kedua orang tua tercinta
Bapak Opik Idham Taufik
dan
Ibu Imas Sumiati A.Md.Keb*

*Serta kedua saudara saya
Alhimny Dwinata Utama
dan*

Septianul Hasby



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul, ``Analisis Distribusi Tegangan *Monocoque Chassis* pada Mobil Hemat Energi dengan Material *Carbon fiber Honeycomb Core*`` dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Rasullulah Muhammad SAW.

Dalam penyusunan skripsi penulis telah mendapatkan bantuan, petunjuk, semangat, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut, antara lain :

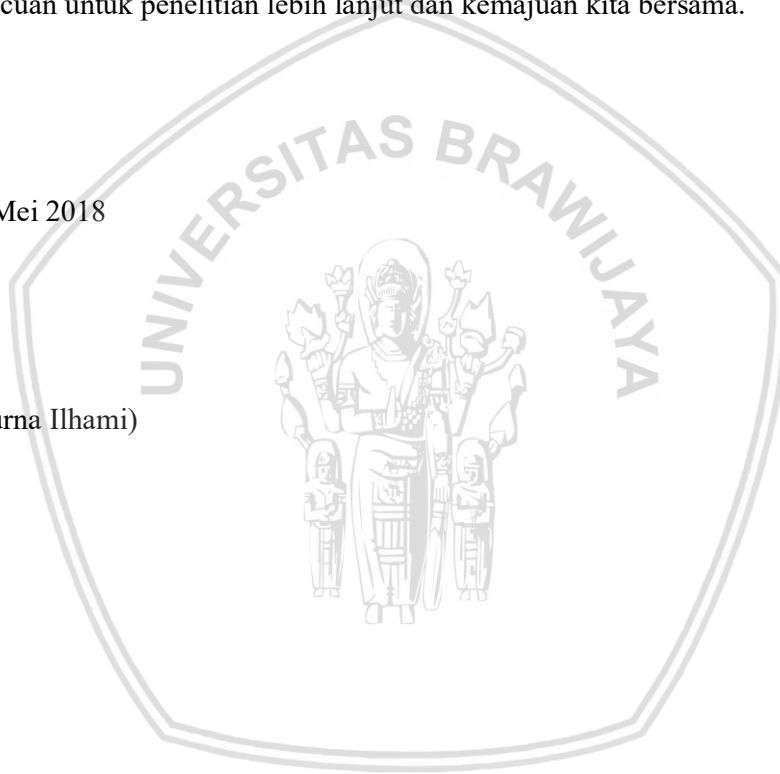
1. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng. Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin, dan Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
2. Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konstruksi.
3. Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberi banyak pengetahuan, motivasi, bimbingan, dan arahan dengan sabar dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan wawasan baru, motivasi, bimbingan, arahan, dan teguran demi kesempurnaan penulisan skripsi ini.
5. Dosen dan staf Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
6. Kedua orang tua yang saya sayangi Opik Idham Taufik dan Imas Sumiati A.Md.Keb
7. Meikha Erfarida Fitri yang telah menemani dan membantu dalam keadaan senang maupun susah
8. Pengurus inti HMM FT UB : Romy, Komeng, Putri, Ilyas, Oji, Gondes, Dodo, Azlan, Ikram, Arda, Ari, Dyan, Farhan, Gede, Hafidh, Ikbar, Lugas, Muchalis, Dauz, Wildan dan Budi.
9. Urang Bandung (URBAN) Malang : Gyda, Haekal, Faizal Hadi, Gheny Ahmad, Arda Nur, Ngakan Nabil, Zaky Yugo, Rachmad, Fauzan, Syafiq, Benedictus, Ghia Alif dan sesepuh yang telah mencetuskan berdirinya panguyuban Urang Bandung di Kota Malang.

10. Kawan Konstruksi : Ilyas, Mutia, Isfan, Tri, Tary, Fadillah, Amir dan Ardi
11. Asisten SPRS : Ilyas, Isfan, Ainul, Fitra, Prayoga dan Ega
12. Saudara – saudara seperjuangan M14 “MAF14”. Terima kasih telah mewarnai perjalanan selama kuliah.
13. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyusunan yang lebih baik. Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut dan kemajuan kita bersama.

Malang, 20 Mei 2018

Penulis
(Pangestu Purna Ilhami)



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN.....	viii
RINGKASAN.....	ix
SUMMARY.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Penelitian Terdahulu.....	5
2.2. <i>Chassis</i>	7
2.2.1. <i>Ladder Chassis</i>	8
2.2.2. <i>Chassis Monocoque</i>	8
2.2.3. Perbandingan <i>chassis</i>	9
2.3. Material Komposit.....	9
2.3.1. Material Penguat (<i>Reinforced</i>).....	10
2.3.2. Material Pengikat.....	14
2.3.3. Jenis-jenis Pengikat (<i>Matrix</i>).....	14
2.3.4. <i>Composite Structure</i>	15
2.3.5. <i>Sandwich Composite</i>	15
2.3.6. Struktur <i>Laminated</i>	16
2.4. Pembebanan pada Struktur <i>Chassis</i>	17
2.5. Hubungan Tegangan dan Regangan.....	18
2.5.1. Prinsip Analisis Tegangan.....	18
2.5.2. Konsep Tegangan dan Regangan.....	19
2.5.3. Teori Deformasi.....	22
2.5.4. Teori Bending.....	24
2.6. <i>Strength of Material</i>	25
2.7. Tinjauan Elemen Hingga.....	25
2.7.1. <i>Orthotropic Material</i>	28
2.7.2. <i>Software FEA</i>	31
2.7.3. <i>Failure Analysis</i>	32
2.7.4. Hipotesis.....	33

BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1. Metode Penelitian.....	35
3.2. Waktu dan Tempat	35
3.3. Variabel Penelitian	35
3.3.1. Variabel Bebas	35
3.3.2. Variabel Terikat	37
3.3.3. Variabel Terkontrol	37
3.4. <i>Meshing</i>	38
3.5. Pengaturan Pembebanan.....	39
3.5.1. <i>Torsional</i>	39
3.5.2. <i>Vertical bending</i>	40
3.6. Prosedur Penelitian.....	41
3.7. <i>Flowchart</i>	42
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	 43
4.1. Hasil Pengujian	43
4.1.1 Deformasi pada <i>Chassis</i>	43
4.1.2 Tegangan pada <i>Chassis</i>	49
4.2. Pembahasan.....	55
4.2.1 Validasi Data Matrix Kekakuan Laminasi	55
4.2.2 Pengaruh Sudut Orientasi pada Laminasi <i>Sandwich Composite</i>	58
4.2.3 Lokasi Deformasi dan Tegangan Maksimal	59
4.2.4 Perbandingan Hasil Variasi Model Sudut Orientasi <i>Carbon fiber</i>	60
 BAB V PENUTUP.....	 63
5.1. Kesimpulan	63
5.2. Saran	64
 DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan <i>Chassis</i>	9
Tabel 2.2.	Perbandingan Material	13
Tabel 2.3.	Sifat mekanik dari thermoset resin.....	14
Tabel 2.4.	Beberapa Jenis Resin Thermoplastic dan Karakteristiknya	15
Tabel 2.5.	<i>Material Properties Epoxy Carbon Woven</i>	30
Tabel 2.6.	<i>Material Properties Core Honeycomb</i>	31
Tabel 3.1.	Variasi Sudut Orientasi <i>Carbon fiber</i>	37
Tabel 4.1.	Tegangan dan deformasi pada seluruh model	60
Tabel 4.2.	<i>Inverse reserve factor (IRF)</i> pada seluruh model	61



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Desain mobil formula sae	6
Gambar 2.2.	ANSYS model of the <i>composite monocoque chassis</i>	6
Gambar 2.3.	Size and shape of experimental analysis.....	7
Gambar 2.4.	<i>Monocoque carrera gt chassis</i>	7
Gambar 2.5.	<i>Ladder chassis</i>	8
Gambar 2.6.	<i>Chassis monocoque</i>	9
Gambar 2.7.	Klasifikasi material komposit.....	10
Gambar 2.8.	Serta kontinyu (a) dan serat diskontinyu (b).	11
Gambar 2.9.	<i>Continuous fiber composite</i>	11
Gambar 2.10.	<i>Woven fiber composite</i>	12
Gambar 2.11.	<i>Randomly oriented discontinuous fiber</i>	12
Gambar 2.12.	Struktur datar dan melengkung pada struktur <i>sandwich</i>	16
Gambar 2.13.	<i>Sandwich structure</i>	16
Gambar 2.14.	Komposit material	17
Gambar 2.15.	Uji <i>torsional load</i>	17
Gambar 2.16.	<i>Vertical bending</i>	18
Gambar 2.17.	Tegangan normal pada material akibat gaya normal.....	19
Gambar 2.18.	Tegangan geser yang diakibatkan gaya geser pada material	20
Gambar 2.19.	Regangan yang terjadi akibat gaya.....	20
Gambar 2.20.	Contoh regangan geser pada material.....	21
Gambar 2.21.	Hubungan tegangan dengan regangan pada baja carbon rendah.....	21
Gambar 2.22.	Struktur <i>simple beam</i> (a) dan <i>cantilever</i> (b).....	24
Gambar 2.23.	Grafik hubungan tegangan dan regangan komposit jenis <i>continous fiber</i> dengan <i>matrix</i>	25
Gambar 2.24.	(a) Macam – macam elemen, (b) Elemen Shell 181.....	27
Gambar 2.25.	Sudut orientasi ply	29
Gambar 3.1.	Desain chasis <i>monocoque aristo evo – 5</i>	35
Gambar 3.2.	<i>Carbon fiber honeycomb core</i>	36
Gambar 3.3.	Sudut orientasi <i>carbon fiber</i> terhadap sumbu x pada bidang x-y <i>sandwich composite</i>	36
Gambar 3.4.	<i>Meshing model</i>	39
Gambar 3.5.	<i>Torsional</i>	40
Gambar 3.6.	<i>Torsional</i> tampak depan.....	40
Gambar 3.7.	<i>Vertical bending</i>	41
Gambar 3.8.	<i>Vertical bending</i> tampak samping	41
Gambar 3.9.	<i>Flowchart</i>	42
Gambar 4.1.	Deformasi pada <i>chassis</i> pembebanan <i>torsional</i> dalam satuan millimeter (mm).....	45
Gambar 4.2.	Deformasi pada <i>chassis</i> pembebanan <i>vertical bending</i> dalam satuan millimeter (mm).....	49
Gambar 4.3.	Tegangan pada <i>chassis</i> dengan pembebanan <i>torsional</i> dalam satuan megapascal (mpa).....	52
Gambar 4.4.	Tegangan pada <i>chassis</i> dengan pembebanan <i>vertical bending</i> dalam megapascal (mpa)	54
Gambar 4.5.	Sudut orientasi lamina	55
Gambar 4.6.	<i>Sandwich composite</i>	56
Gambar 4.7.	Nilai matrik ABD pada software ACP-ANSYS 18.2.....	58

Gambar 4.8. Ilustrasi deformasi pada *chassis* (a) *cantilever beam*, (b) *simple beam*60



DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul
Lampiran 1.	Tegangan per-ply
Lampiran 2.	Uji tarik spesimen



RINGKASAN

Pangestu Purna Ilhami, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2018, *Analisis Distribusi Tegangan Monocoque Chassis Pada Mobil Hemat Energi Dengan Material Carbon Fiber Honeycomb Core*, Dosen Pembimbing : Moch. Agus Choiron dan Nafisa Arina Hidayati.

Kendaraan hemat energi merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi energi. Faktor – faktor yang mempengaruhi efisiensi energi dalam kendaraan adalah berat total, gaya drag pada kendaraan, gesekan pada komponen transmisi dan efisiensi *engine*. Faktor pada kendaraan yang dapat direayasa lebih mudah dan memberikan hasil yang signifikan dibandingkan dengan faktor lain adalah faktor berat total kendaraan. Penggunaan material komposit pada *chassis* dapat menjadi salah satu solusi untuk mengurangi berat pada kendaraan.

Penelitian ini menggunakan beban *torsional* dan *vertical bending* memakai desain *chassis* milik Apatte 62 Brawijaya dengan 4 lapis *epoxy carbon fiber* dengan inti *aluminum honeycomb*. Menunjukan hasil sudut orientasi *carbon fiber* menunjukan perbedaan terhadap distribusi tegangan dan deformasi *chassis*.

Hasil deformasi terbesar pada beban *torsional* sebesar 13,723 mm pada laminasi model ke-3 [45/45/*core*/0/0] dan terkecil sebesar 9,867 mm pada laminasi model ke-6 [0/45/*core*]_s, sedangkan deformasi terbesar pada beban *vertical bending* sebesar 2,089 mm pada laminasi model ke-1 [45/45/*core*]_s dan terkecil sebesar 1,577 mm pada laminasi model ke-6 [0/45/*core*]_s. Hasil tegangan terbesar pada beban *torsional* sebesar 111,212 MPa pada laminasi model ke-6 [0/45/*core*]_s dan terkecil sebesar 82,653 MPa pada laminasi model ke-1 [45/45/*core*]_s, sedangkan tegangan terbesar pada beban *vertical bending* sebesar 51,024 MPa pada laminasi model ke-6 [0/45/*core*]_s dan terkecil sebesar 30,327 MPa pada model ke-5 laminasi [45/0/*core*]_s. Dari hasil tersebut didapatkan perbedaan nilai deformasi dan tegangan akibat variasi sudut orientasi *carbon fiber*.

Kata kunci : mobil hemat energi, *chassis monocoque*, struktur *sandwich carbon fiber* inti *honeycomb*,

SUMMARY

Pangestu Purna Ilhami, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, May 2018, *Stress Distribution Analysis on Monocoque Chassis Eco Car with Material Carbon fiber Honeycomb Core*, Academic Supervisor: Moch. Agus Choiron and Nafisa Arina Hidayati.

Eco car is one of many solutions to improve energy efficiency. Factor that affecting energy efficiency in a vehicle are total weight, drag force on the vehicle, friction on transmission components and engine efficiency. Factor in vehicles that can be engineered more easily and deliver significant results compared with other factors is the total weight vehicle. The use of composite materials on the chassis can be a solution to reduce the weight on the vehicle.

This study uses torsional load and vertical bending loads using Apatte 62 Brawijaya chassis design with 4 layers of epoxy carbon fiber with aluminum honeycomb core. Indicates the results of carbon fiber orientation angle shows the difference in stress distribution and chassis deformation.

Result for the largest deformation result at a torsional load is 13,723 mm on the 3rd laminate model [45/45/core/0/0] and the smallest is 9,867 mm in the 6th laminate model [0/45/core]s, while the largest deformation in the vertical bending load is 2,089 mm on the 1st laminate model [45/45/core]s and the smallest is 1,577 mm in the 6th laminate model [0/45/core]s. The largest stress result at the torsional load is 111,212 MPa on the 6th laminate model [0/45/core]s and the smallest is 82,653 MPa on the 1st laminate model [45/45/core]s, while the largest stress on the vertical bending load is 51,024 MPa on the 6th laminate model [0/45/core]s and smallest is 30,327 MPa on the 5th laminate model [45/0/core]ss. From these results obtained the differences of deformation and stress values due to variations in carbon fiber orientation angle.

Keywords : eco car, monocoque chassis, sandwich structure carbon fiber honeycomb core

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kendaraan hemat energi adalah salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi energi. Faktor – faktor yang mempengaruhi efisiensi energi dalam kendaraan adalah berat total, gaya drag pada kendaraan, gesekan pada komponen transmisi dan efisiensi *engine*. [(Bickel,2017), (Acosta et al,2012), (Irimescu et al,2011), (Burt et al,2006)]. Untuk menghasilkan kendaraan hemat energi maka diperlukan rekayasa pada sistem penggerak ataupun komponen struktur dari kendaraan tersebut. Dengan berat kendaraan yang lebih ringan maka konsumsi energi yang dibutuhkan semakin kecil (Bickel, 2017). Faktor pada kendaraan yang dapat direkayasa lebih mudah dan memberikan hasil yang signifikan dibandingkan dengan faktor lain adalah faktor berat total kendaraan. Berat kendaraan pada umumnya didominasi oleh *engine*, *chassis* dan *body*. Pada bagian *engine*, eliminasi komponen tidak disarankan demi mengurangi berat kendaraan karena dapat mempengaruhi performa *engine* dan keselamatan. Untuk menurunkan berat kendaraan, bagian *chassis* dan *body* dapat direkayasa dengan penggunaan material yang lebih ringan tetapi tetap memperhatikan keselamatan.

Chassis adalah suatu struktur kendaraan yang membawa semua komponen dan menahan semua beban (Mat et al, 2012). Peranan *chassis* adalah sebagai tempat melekatnya berbagai komponen kendaraan mulai dari suspensi, poros, instrumen pengereman, *body*, *engine*, dan komponen lainnya. Terdapat beberapa jenis beban kerja yang menumpu pada *chassis* seperti *vertical bending* dan *torsional* (Eurenius, 2013). Dikarenakan beban dari komponen yang melekat mengakibatkan terbentuknya distribusi tegangan pada *chassis*. Distribusi tegangan berfungsi untuk menentukan kekuatan, keamanan dan kemungkinan kegagalan pada struktur *chassis*. Terdapat beberapa jenis *chassis* yang digunakan untuk kendaraan salah satunya adalah jenis *monocoque*. *Monocoque chassis* adalah sebuah jenis *chassis* dimana *body* dan *chassis* menjadi satu bagian penopang penerima beban (Wakeham, 2009). Dikarenakan *body* dan *chassis* menjadi satu bagian maka berat *chassis* kendaraan menjadi semakin ringan. Jenis *chassis monocoque* biasanya menggunakan bahan logam pada kendaraan massal dan komposit

carbon fiber composite (CFC) untuk kendaraan balap seperti F1 atau *sportcar*. Pemakaian material komposit dalam kendaraan bertujuan untuk menurunkan bobot kendaraan tetapi memiliki kekuatan cukup tinggi setara dengan logam

Penggunaan material komposit pada *chassis* dapat menjadi salah satu solusi untuk mengurangi berat pada kendaraan. CFC memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan kekuatan paduan *aluminum* (Miner, 2016;Imran, 2016). Pada simulasi struktur *monocoque chassis prototype* mobil hemat energi dengan menggunakan material *epoxy carbon woven wet* variasi sudut orientasi *fiber* diperoleh hasil deformasi yang berbeda – beda setiap variasi dan relatif tinggi (Nashdian, 2017). Menurut penelitian Wanga et al (2018) pada material CFC *honeycomb aluminum core* dengan beberapa variasi densitas dapat diketahui bahwa struktur tersebut dapat menerima beban bending besar tetapi tetap kuat dan ringan. Dari penelitian diatas dapat diketahui bahwa material CFC dengan penambahan *honeycomb core* memungkinkan untuk diaplikasikan pada struktur *chassis* kendaraan hemat energi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, agar dapat memangkas bobot kendaraan dan konsumsi energi pada kendaraan maka perlu diadakannya penelitian pada struktur *chassis* kendaraan hemat energi menggunakan *chassis* tipe *monocoque* dengan material *carbon fiber honeycomb core* variasi sudut orientasi *carbon fiber* menggunakan *software* berbasis *Finite Element Analysis (FEA)* ANSYS 18.2. Harapannya penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk pengembangan kendaraan dengan konsumsi energi lebih hemat.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat diambil rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah bagaimanakah distribusi tegangan dan deformasi pada *monocoque chassis prototype* mobil hemat energi dengan menggunakan material *carbon fiber honeycomb sandwich structure* dengan variasi sudut orientasi *carbon fiber*?

1.3. Batasan Masalah

Akibat banyaknya kemungkinan yang terjadi agar hasil dari penelitian ini , maka permasalahan dibatasi oleh:

1. Material yang digunakan adalah *epoxy carbon fiber*, *honeycomb* dan *epoxy resin*
2. Serat dan matriks berikatan secara sempurna
3. Lapisan terikat secara sempurna tidak ada cacat

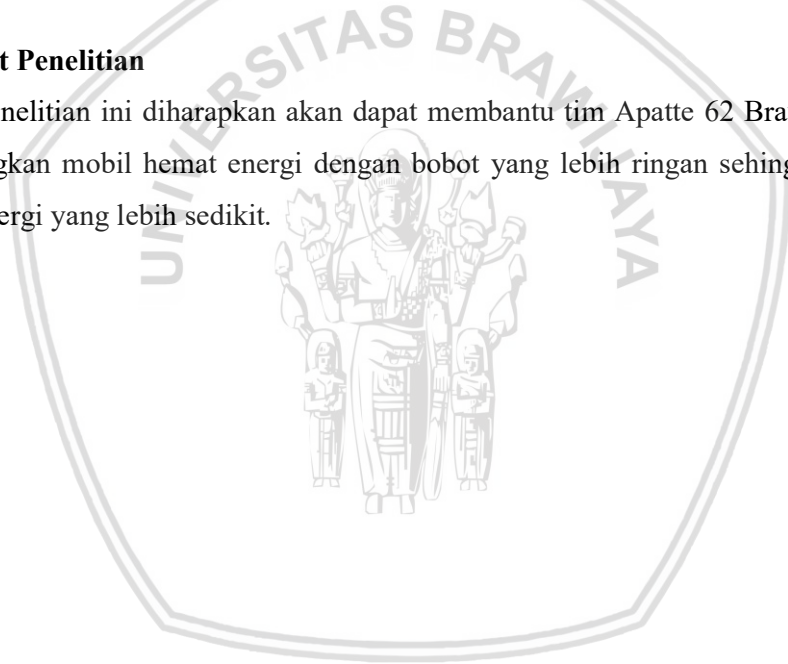
4. Properties material berdasarkan pada data yang didapatkan pada beberapa sumber dan dimasukan pada aplikasi ANSYS 18.2
5. Beban yang diaplikasikan adalah beban *vertical bending* dan *torsional*
6. Desain *chassis* yang digunakan *prototype* mobil hemat energi dengan modifikasi komponen body seperti kap mesin dan pintu pengemudi tidak termasuk kedalam struktur *chassis*

1.4. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh sudut orientasi *carbon fiber* terhadap distribusi tegangan dan deformasi pada struktur *monocoque chassis* prototipe mobil hemat energi dengan material *carbon fiber honeycomb core*.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan akan dapat membantu tim Apatte 62 Brawijaya untuk mengembangkan mobil hemat energi dengan bobot yang lebih ringan sehingga memiliki konsumsi energi yang lebih sedikit.





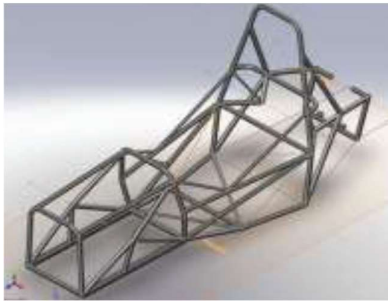
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

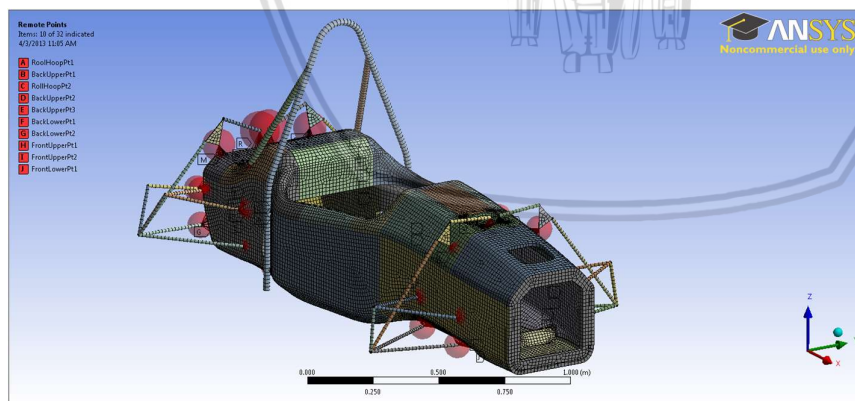
Nashdian (2017) meneliti tentang “Analisis Tegangan Dan Deformasi Pada *Chassis Monocoque* Mobil Hemat Energi”. Desain yang digunakan adalah Aristo generasi pertama. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah material komposit *Epoxy Carbon Woven Wet*. Variasi yang digunakan adalah tebal material dan orientasi sudut *carbon fiber*. Dalam penelitian tersebut terdapat 6 model variasi. Pembebanan yang dilakukan adalah *vertical bending*, *torsional*, *horizontal lozenging* dan *lateral bending*. Pembebanan berasal dari berat pengemudi dan berat *engine*. Semua model dalam penelitian tersebut dapat dikatakan aman karena tegangan yang dihasilkan masih dibawah kekuatan material yang digunakan.

Mat & Ghani (2012) meneliti tentang “Design and Analysis of ‘Eco’ Car *Chassis*” menggunakan *software FEM* Abaqus CAE. Dalam penelitian tersebut desain *chassis* yang digunakan adalah *chassis* tipe spaceframe dengan material *Mild Steel* dengan kekuatan *yield* 300 Mpa. Profil yang digunakan adalah profil *circular hollow section* dengan diameter 50mm dan tebal 2mm. Pembebanan yang digunakan adalah dead load (*vertical bending*), 4G beban pada main hoop, 1,5 G akselerasi pada poros, 1,5 G deselerasi pada poros dan *Torsional Loading (torsional)* sebesar 2500 N/m. Berdasarkan hasil penelitian tersebut tegangan maksimal pada pembebanan *vertical bending* bernilai 52,3 MPa, pada pembebanan 1,5 G akselerasi bernilai 85.6 Mpa, pada pembebanan deselerasi bernilai 73 Mpa dan pada pembebanan *torsional* bernilai 199.6 Mpa. Dapat disimpulkan bahkan desain *chassis* sudah aman karena semua tegangan maksimal dari semua pembebanan dibawah nilai 300 MPa kekuatan *yield* material.



Gambar 2.1. Desain mobil formula sae
Sumber : Mat & Ghani (2012)

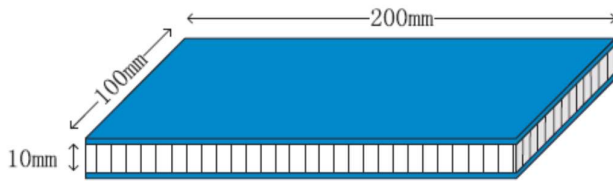
Wu et al. (2013) meneliti tentang mendesain, menganalisis dan mensimulasi *chassis monocoque* menggunakan *software FEM*. Pada penelitian tersebut terdapat bagian optimasi material pada kabin penumpang. Material yang digunakan adalah *sandwich structure* dengan T300 *weaves carbon fiber* and 5250 *aluminum core*. Terdapat berturut - turut 7 lapisan *carbon fiber* dan 1 lapisan *aluminum core*. Sudut orientasi *carbon fiber* divariasikan dengan 7 model berbeda. Model tersebut adalah $[0/45/0/45/0/45/0/core]$, $[0/0/0/0/45/45/45/core]$, $[0/0/0/45/45/45/45/core]$, $[0/0/45/45/45/45/45/core]$, $[45/0/45/45/45/45/45/core]$, $[0/45/45/45/45/45/45/core]$ dan $[45/45/45/45/45/45/45/core]$. Hasil penelitian tersebut adalah model dari $[45/45/45/45/45/45/45/core]$ memiliki *torsional stiffness* paling tinggi di antara ke 7 model. *Torsional stiffness* Model 7 memiliki nilai *torsional stiffness* 15% lebih tinggi dibandingkan dengan model 1 81.6 kNm/deg.



Gambar 2.2. ANSYS model of the *composite monocoque chassis*
Sumber : Wu et al. (2014,p.20)

Wanga et al. (2018) meneliti tentang material *carbon fiber* yang ditambahkan *honeycomb core* menggunakan metode eksperimental three-point bending test dan peeling test pada spesimen *carbon fiber* struktur sandwich dengan material aluminum honeycomb core. Penelitian ini mempunyai variasi pada tebal dan densitas core. Pada variasi tebal core

10 mm dengan densitas *core* 101 kg/m³ menghasilkan gaya maksimal rata-rata sebesar 3.47kN.



Gambar 2.3. Size and shape of experimental analysis

Sumber : Wang et al (2018)

2.2. Chassis

Chassis adalah suatu struktur kendaraan yang membawa semua komponen dan menahan semua beban (Mat & Ghani, 2012). Peranan *chassis* adalah sebagai struktur penyangga tempat untuk melekatnya berbagai macam komponen kendaraan seperti komponen suspensi, poros, bagian komponen pengereman, *body*, *engine*, dan komponen lainnya.

Dikarenakan *chassis* merupakan struktur terberat dari suatu kendaraan maka berat dari *chassis* sendiri dapat mempengaruhi konsumsi bahan bakar sehingga *chassis* kendaraan haruslah ringan.

Chassis kendaraan umumnya menggunakan material logam seperti baja dan aluminium. Alasan penggunaan material baja karena baja memiliki karakteristik kaku, kuat, memiliki *ultimate strength* tinggi serta mudah pengerjaannya. Walaupun baja masih digunakan untuk *chassis* kendaraan karena kelebihanannya tersebut, baja memiliki kekurangan dengan bobotnya. Terkadang penggantian material dengan material komposit dapat menjadi solusi untuk menurunkan bobot *chassis*.



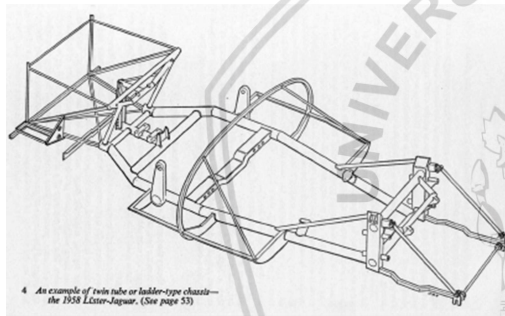
Gambar 2.4. Monocoque carrera gt chassis

Sumber : Teamspeed (2010)

2.2.1. Ladder Chassis

Ladder chassis adalah jenis *chassis* yang terdiri dari dua balok panjang yang memanjang sepanjang kendaraan dan memberikan tumpuan kuat untuk berat pada awalnya berdasarkan desain gerbong. Tipe kendaraan *body* diatas *chassis* adalah contoh bagus untuk *chassis* jenis ini. (Wakeham : 2009)

Ladder chassis terkenal dengan kekakuan *torsional*. Dengan menggunakan Aluminium, sehingga basis pembanding dapat dilakukan pada *chassis* lain dalam buku ini, sebuah *Ladder chassis* sederhana berbobot hanya 13,85 kg dan memiliki kekakuan torsi 522,6 Nm/derajat. Baja pada 39.25kg memiliki kekakuan torsi 1424 Nm/derajat. Nilai kedua orde ini besarnya kurang dari *chassis monocoque* dan setidaknya kurang dari satu orde teknik konstruksi lainnya.



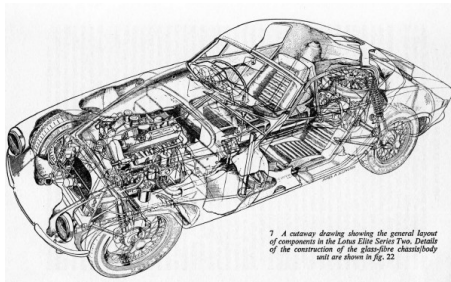
Gambar 2.5. Ladder chassis

Sumber : *Racing & Sports Cars Chassis Design* (1961)

2.2.2. Chassis Monocoque

Monocoque berasal dari bahasa Prancis terdiri dari kata *mono* "satu" dan *coque* "tempurung" adalah konstruksi dimana tumpuan beban struktural menggunakan tempurung benda kerja. Ini berbeda dengan penggunaan kerangka internal kerja (atau truss) yang kemudian ditutupi dengan *non-load-bearing skin*.

Sebuah *chassis monocoque* dapat dikatakan sebagai kendaraan dimana *body* eksternal benda kerja adalah bantalan beban. Meskipun ini adalah definisi teknis, penggunaan yang diterima akan berbeda. Sebuah kendaraan seperti Koenigsegg ccx dianggap *monocoque* namun masih memiliki *bodywork* dan selain *load bearing skin* aktual sebenarnya ada di bagian luar kendaraan kecuali dibagian bawahnya.



Gambar 2.6. *Chassis monocoque*

Sumber : *Racing & Sports Cars Chassis Design* (1961)

2.2.3. Perbandingan *chassis*

Perbandingan kelemahan dan kelebihan *chassis* dijelaskan pada Tabel 2.1 dibawah:

Tabel 2.1.

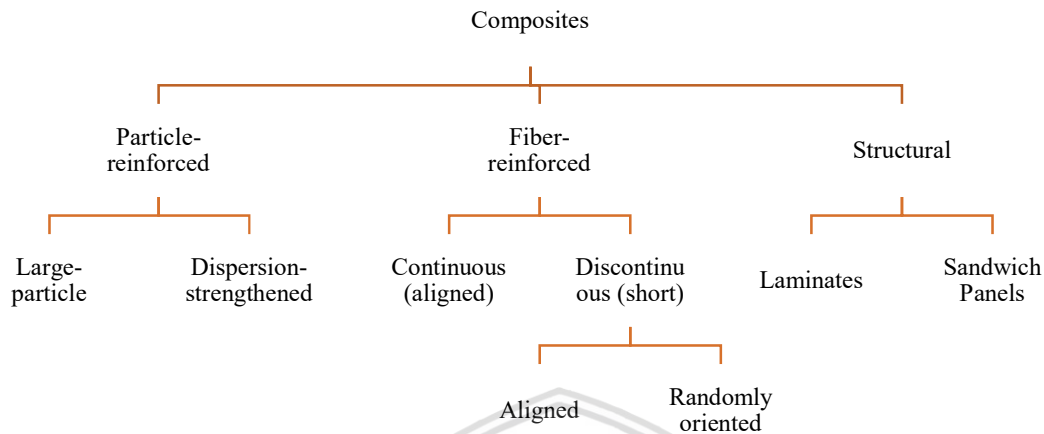
Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan *Chassis*

Jenis	Kelebihan	Kekurangan
<i>Ladder</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah untuk didesain, manufaktur dan modifikasi • Mudah untuk diperbaiki • Cocok untuk kendaraan berat dan <i>off road</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Lebih berat dibandingkan <i>chassis</i> model lainnya • Mudah terguling akibat tingginya <i>center of gravity</i>
<i>Monocoque</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bobot ringan • <i>Handling</i> lebih lembut • Ground clearance rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulit diperbaiki • Sulit untuk modifikasi

Sumber : Dwiyanto (2015)

2.3. Material Komposit

Komposit merupakan suatu material yang dibentuk oleh kombinasi dari dua material atau lebih beberapa material melalui perpaduan yang tidak homogen dan sifat mekanik dari beberapa material yang membentuk komposit memiliki sifat yang berbeda (Matthews et al. .1993). Dari perpaduan tersebut maka akan menghasilkan sebuah material komposit yang memiliki properti mekanik dan juga karakteristik yang memiliki sifat yang berbeda dari material yang membentuknya. Komposit biasanya tersusun dari material penguat biasa disebut *reinforced material* dan material pengikat biasa disebut *matrix material*. Dalam beberapa banyak kasus pada material komposit, material penguatnya memiliki sifat lebih kuat, lebih keras, dan lebih kaku daripada material matriksnya (ASM International, 2010)



Gambar 2.7. Klasifikasi material komposit

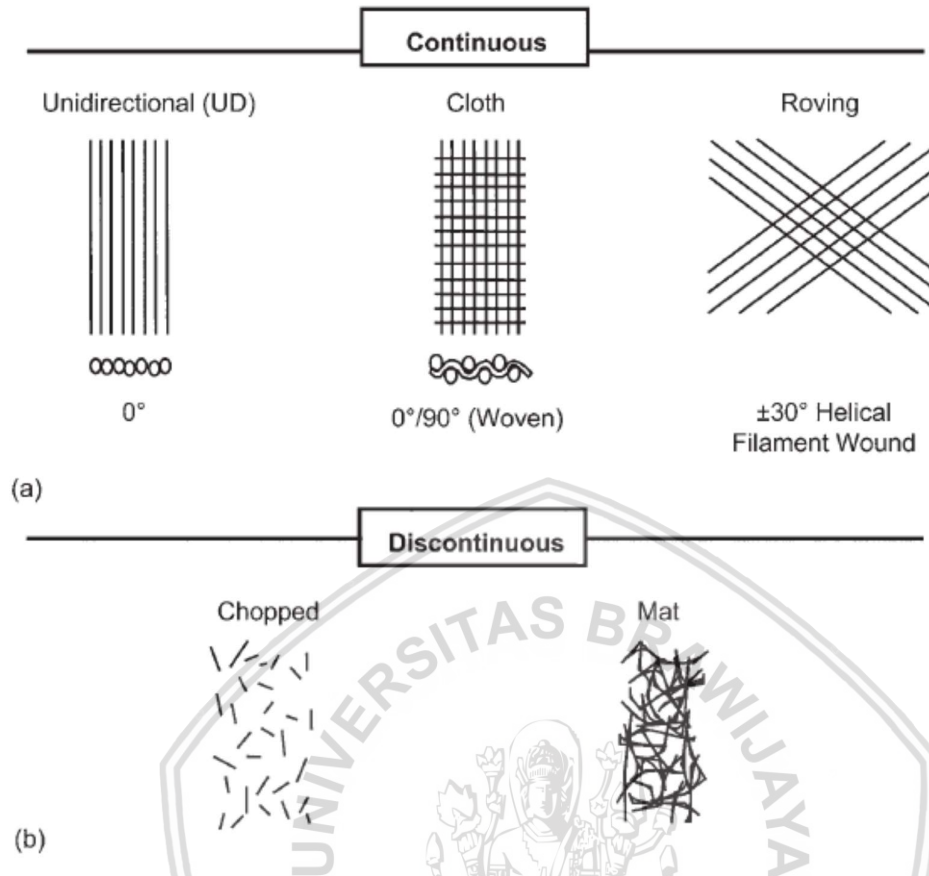
Sumber : W.D.Callister (1994,p.579)

2.3.1. Material Penguat (*Reinforced*)

Material penguat memberikan sifat kekuatan dan kekakuan pada material komposit. Dalam banyak kasus material penguat cenderung lebih keras, lebih kuat, dan lebih kaku daripada material dari matriks. Material penguat pada komposit biasanya berbahan *fiber* atau partikulat.

Material penguat bentuk partikulat memiliki besaran yang kira-kira sama pada setiap arahnya. Partikulat berbentuk lonjongan, pelet atau bentuk yang beraturan atau tidak beraturan. Material komposit dengan penguat partikulat cenderung lebih lemah dan tidak kaku bila dibandingkan dengan material komposit dengan penguat *fiber*. (ASM International, 2010).

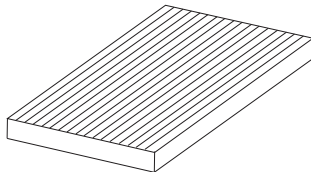
Fiber atau serat adalah benang atau struktur atau objek yang menyerupai benang (Merriam-Webster, 2018). Fiber memiliki panjang yang jauh lebih besar dibandingkan dengan diameternya. *Continuous-fiber* (serat kontinyu) memiliki orientasi khusus, ketika sementara *discontinuous-fiber* (serat diskontinyu) umumnya memiliki orientasi acak. Contoh serat kontinyu *unidirectional*, *woven cloth* dan *helical winding*, sedangkan untuk serat diskontinyu ada serat cincang dan serat acak dijelaskan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Serta kontinyu (a) dan serat diskontinyu (b).
Sumber : ASM International (2010)

1. Uni-directional

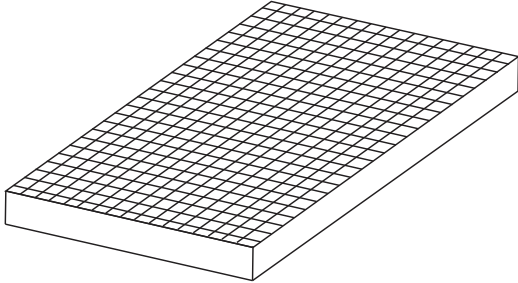
Uni-directional, mempunyai serat yang lurus dan lanjut, helaian antar serat diikat oleh matriknya. Komposit tersebut memiliki kelemahan pada kekuatan ikatan antar helaian serat atau tegak lurus serat, hal tersebut disebabkan oleh kekuatan ikatan antara helaian-helaian serat dipengaruhi oleh kekuatan matriknya karena beban tidak di tahan oleh *fiber*.



Gambar 2.9. Continuous fiber composite
Sumber : Gibson, Ronald F (1994,p.25)

2. *Woven/cloth fiber composite*

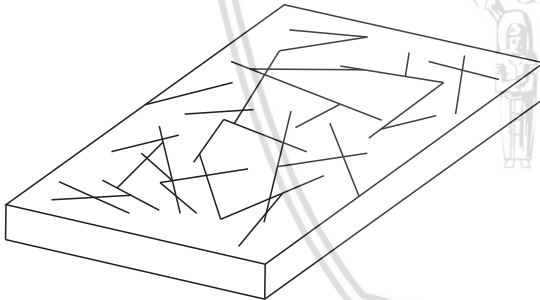
Komposit ini terdiri dari beberapa rangkai helaian serat yang dianyam menjadi anyaman serat (*woven fiber*).



Gambar 2.10. *Woven fiber composite*
Sumber : Gibson, Ronald F (1994,p.25)

3. Komposit berserat pendek (*discontinuous fiber composite*)

Material komposit berserat acak merupakan material komposit yang memiliki material penguat dengan serat yang ukurannya dibuat pendek atau dengan kata lain tidak kontinyu.



Gambar 2.11. *Randomly oriented discontinuous fiber*
Sumber : Gibson, Ronald F (1994,p.25)

Jenis-jenis serat yang biasanya terdapat dipasaran yaitu : fiberglass, *carbon fiber*, kevlar. Perbandingan properti material tersebut dapat dijelaskan di Tabel 2.2.

Tabel 2.2.
Perbandingan Material

	<i>Carbon fiber Woven</i>	<i>Fiberglass</i>	Aluminum
UTS	584 MPa	422 MPa	414 MPa
Modulus Young	59.6 GPa	26.6 GPa	73 GPa
Massa Jenis	1630 kg/m ³	2000 kg/m ³	2800 kg/m ³

Sumber : L.A. Carlsson (2011,p.16)

1. *Carbon fiber* (serat karbon)

Serat karbon merupakan bahan yang sangat tipis yang terdiri dari serat sekitar 0,005-0,010 mm yang sebagian besar berbahan atom *carbon*. *Carbon fiber* memiliki pola yang berbeda dan dapat dikombinasikan dengan resin plastik dan dipanggang atau dibentuk untuk membentuk material komposit seperti *carbon-fiber-reinforced polymer* untuk menjadikan bahan dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi.

Densitas serat karbon ini juga jauh lebih rendah dari densitas dari baja, sehingga ideal untuk aplikasi yang memerlukan berat rendah. Sifat serat karbon adalah kekuatan tarik tinggi, berat rendah, dan ekspansi termal rendah.

2. *Fiberglass* (serat kaca)

Secara kimia, komponen utama penyusun serat gelas ini adalah Silica atau Quartz. Karakteristik serat gelas atau *fiberglass* sangat bergantung pada komposisi penyusunnya. Secara umum, serat gelas atau *fiberglass* dibagi menjadi dua jenis yaitu *low-cost-general-purpose fiber* dan *premium special-purpose fibers*. (ASM Handbook, 2001)

Pada industri pesawat terbang dan otomotif, serat gelas yang umum digunakan adalah *low-cost-general-purpose fiber* dengan berbagai jenis diantaranya yaitu E-Glass, S-Glass dan C-Glass.

a. E-Glass

Merupakan jenis *Fiber Glass* yang paling umum digunakan karena biaya produksinya yang tergolong rendah. Huruf kapital “E” berarti *electrical insulator*.

b. S-Glass

Merupakan jenis *fiber glass* yang paling umum digunakan pada industri militer dan industri pesawat terbang karena sifatnya yang tergolong kuat. Huruf kapital “S” berarti Strength sehingga nama lain S-Glass adalah *High-Strength Glass*. S-Glass memiliki nama lain seperti R-Glass yang digunakan di wilayah Eropa, dan T-Glass di negara Jepang.

c. C-Glass

Merupakan jenis *fiber glass* yang umumnya digunakan pada pembuatan tank penyimpanan, pipa, atau komponen lainnya yang membutuhkan ketahanan terhadap bahan kimia. Huruf kapital “C” berarti chemical resistance.

2.3.2. Material Pengikat

Material pengikat atau *matrix* berfungsi sebagai perekat material penguat dan penerus gaya yang diterima oleh material pengikat menuju material penguat. Material pengikat juga dapat sebagai pencegah atau dapat juga sebagai media untuk memperlambat retakan dengan cara memisahkan serat-serat pada material komposit, sehingga masing-masing dari serat-serat dapat bekerja untuk menahan gaya secara terpisah. Selain itu material pengikat dapat melindungi material penguat dari kerusakan akibat kimiawi dan keausan.

2.3.3. Jenis-jenis Pengikat (*Matrix*)

1. Resin jenis thermoset

Thermoset resin memiliki sifat tidak dapat dicairkan dan dibentuk kembali ketika resin sudah bereaksi dan mengering. Saat pengeringan terjadi pada material *thermoset resin*, akan terbentuk suatu ikatan yaitu ikatan molekul. Ikatan molekul tersebut akan menjadi penyebab material komposit menjadi lebih kaku. Thermoset resin yang terdapat dipasaran paling umumnya digunakan oleh masyarakat luas adalah *polyester, bismaleimids, epoxy, vinylester, phenolics, cyanate ester, dan polyimides*. Perbandingan sifat material pengikat atau matriks dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3.
Sifat mekanik dari thermoset resin

<i>Resin Material</i>	<i>Density (g/cm³)</i>	<i>Tensile Modulus</i> Gpa (10 ⁶ psi)	<i>Tensile Strength</i> MPa (10 ³ psi)
<i>Epoxy</i>	1,2-14	2,5-5,0 (0,35-0,72)	50-110 (7,2-16)
<i>Phenolic</i>	1,2-1,4	2,7-4,1 (0,4-0,6)	35-60 (5-9)
<i>Polyester</i>	1,1-1,4	1,6-4,1 (0,23-0,6)	35-95 (5,0-13,8)

Sumber : Sanjay K. Mazumdar (2002,p.29)

2. Thermoplastic resin

Pada umumnya resin jenis *thermoplastic* bersifat relatif lebih ulet juga memiliki sifat yang lebih tangguh jika dibandingkan dengan resin dengan jenis *thermoset*. Resin

jenis *thermoplastic* memiliki sifat dapat dicairkan lalu dibentuk kembali. Jika dibandingkan dengan jenis *thermoset*, *thermoplastic resin* lebih mudah untuk mulur pada suhu tinggi. Berikut adalah beberapa jenis resin *thermoplastic* beserta properti mekanis material.

Tabel 2.4.

Beberapa Jenis Resin Thermoplastic dan Karakteristiknya

Resin Material	Density (g/cm ³)	Tensile Modulus	Tensile Strength
		Gpa (10 ⁶ psi)	MPa (10 ³ psi)
Nylon	1,1	1,3-3,5 (0,2-0,5)	55-90 (8-13)
PEEK	1,3-1,35	3,5-4,4 (0,5-0,6)	100 (14,5)
PPS	1,3-1,4	3,4 (0,49)	80 (11,6)
Polyester	1,3-1,4	2,1-2,8 (0,3-0,4)	55-60 (8-8,7)
Polycarbonate	1,2	2,1-3,5 (0,3-0,5)	55-70 (8-10)
Acetal	1,4	3,5 (0,5)	70 (10)
Polyethylene	0,9-1,0	0,7-1,4 (0,1-0,2)	20-35 (2,9-5)
Teflon	2,1-2,3	-	10-35 (1,5-5)

Sumber : Sanjay K.Mazumdar (2002:52)

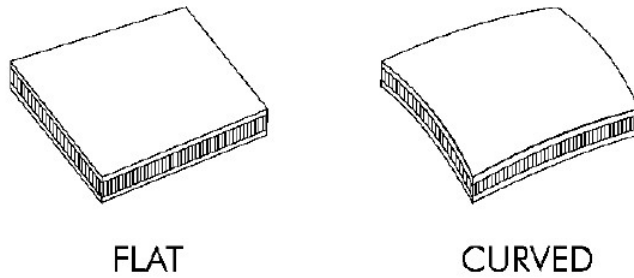
2.3.4. Composite Structure

Berdasarkan Gambar 2.7 struktural pada material komposit terbagi menjadi dua struktur, yaitu :

1. *Sandwich composite*
2. *Laminates composite*

2.3.5. Sandwich Composite

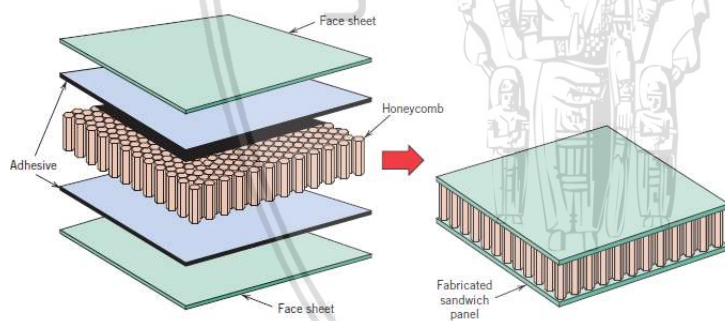
Sandwich composite adalah kelas khusus dari bahan komposit yang dibuat dengan menempelkan dua kulit tipis (*face sheet*) namun kaku ke inti (*core*) yang ringan namun tebal. Bahan dasarnya biasanya bahan dengan kekuatan rendah, namun ketebalannya yang lebih tinggi memberikan komposit *sandwich* dengan kekakuan lentur tinggi dengan kerapatan rendah secara keseluruhan.



Gambar 2.12. Struktur datar dan melengkung pada struktur *sandwich*
 Sumber : L.A. Carlsson (2011,p.2)

Pemilihan material pada *Face* dan *Core* membutuhkan analisa tentang mekanika struktur *sandwich*. Adapun hal yang perlu diperhatikan dalam merancang struktur *sandwich* yaitu :

1. *Bending stiffness* pada struktur *sandwich* beam
2. Tegangan pada *face* dan *core*
3. Kegagalan *face* dan *core*



Gambar 2.13. *Sandwich structure*
 Sumber : W.D.Callister (1940,p.612)

2.3.6. Struktur *Laminated*

Struktur *laminated* terdiri dari beberapa lapisan-lapisan *lamina* atau *ply* material penguat yang direkatkan oleh material pengikat menjadi suatu kesatuan material komposit. Proses untuk melaminasi material komposit dibagi oleh 2 cara yaitu:

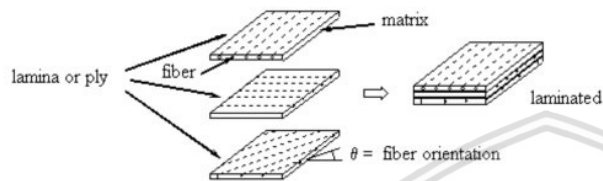
1. *Dry lamination*

Proses ini menggunakan material prepregs (*pre-impregnated fabrics*) yaitu material penguat (*reinforced*) yang berupa serat atau tenunan telah dicampurkan oleh pengikat (*Matrix*) atau resin terlebih dahulu. Ukuran ketebalannya berkisar antara

0,127 mm hingga 0,254. Jenis serat yang biasanya digunakan pembuatan *prepregs* umumnya berupa serat *glass*, serta *carbon*, dan *aramid* (kevlar).

2. *Wet lamination*

Proses ini merupakan metode laminasi dimana material penguat belum tercampur oleh material pengikat sehingga material penguat diperlukan proses lebih lanjut untuk bercampur dengan material penguat.



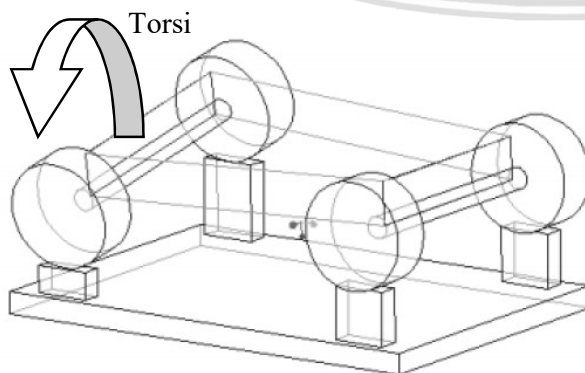
Gambar 2.14. Komposit material
Sumber : Koidel (2013)

2.4. Pembebanan pada Struktur *Chassis*

Pembebanan pada struktur *chassis* dapat dilakukan dengan pembebanan struktur secara statis. Dalam pembebanan pada *chassis* secara statis, struktur *chassis* akan diberi beban kerja tertentu. Beban kerja struktur yang akan dibebankan pada *chassis* yaitu :

a. *Torsional load*

Torsional load pada Gambar 2.15 adalah salah satu kondisi pembebanan pada saat roda kendaraan melewati permukaan jalan yang tidak rata atau dengan kata lain memiliki perbedaan ketinggian pada roda. Pembebanan terjadi pada sisi terluar pada *chassis* akibat gaya yang berasal dari puntiran pada tumpuan roda kendaraan (Wu et al., 2014)

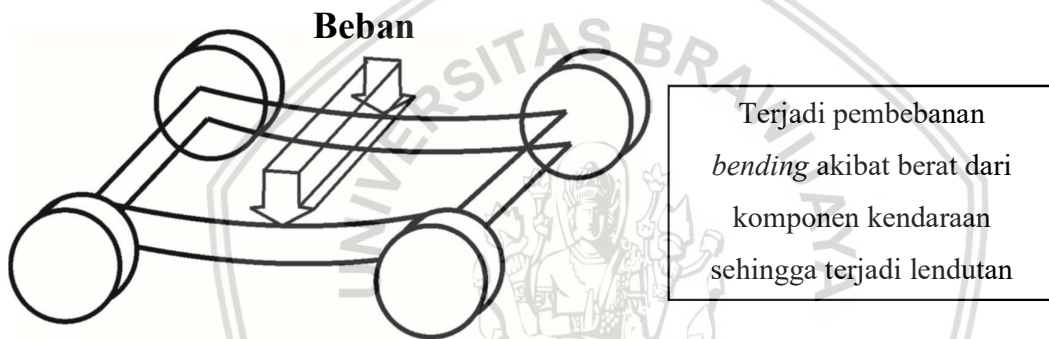


Terjadi perbedaan ketinggian pada posisi roda sehingga terjadi beban *torsional* pada *chassis*

Gambar 2.15. Uji *torsional load*
Sumber : Eurenus (2013,p.12)

d. *Vertical bending*

Vertical bending adalah cara pembebanan untuk menunjukkan ketahanan *chassis* terhadap berat komponen mobil lainnya seperti mesin, *body*, sayap, *drivetrain*, dan pengemudi dibawah pengaruh gravitasi dengan kata lain menggunakan berat mobil untuk menentukan apakah *chassis* cukup kuat untuk menahan berat mobil. (Hazimi et al, 2018) Saat perencanaan *chassis*, pembebanan *vertical bending* bukan merupakan pembebanan terbesar sehingga memerlukan pembebanan lain untuk pertimbangan keamanan. *Chassis* yang memiliki ketahanan puntir atau *torsional* yang tinggi biasanya juga dapat menahan pembebanan dari *vertical bending*. (Milliken dan Milliken : 1995)



Gambar 2.16. *Vertical bending*
Sumber : Hazimi (2013,p.3)

2.5. Hubungan Tegangan dan Regangan

2.5.1. Prinsip Analisis Tegangan

Prinsip untuk menganalisis tegangan pada suatu struktur berhubungan sifat dari material ketika mengalami suatu pembebanan atau dengan nama lain ilmu mekanika bahan. Tujuan utama untuk menganalisis tegangan pada struktur adalah menemukan nilai tegangan dan nilai regangan pada suatu material, mengetahui nilai deformasi dan defleksi akibat pembebanan statis pada struktur dan memperoleh kesimpulan dan hasil dari analisis tersebut. Beberapa prinsip dalam menganalisis suatu tegangan pada struktur yaitu :

- Keseimbangan resultan gaya dan resultan momen

Persamaan paling dasar dalam menyelesaikan permasalahan suatu struktur secara statis, berlaku persamaan sebagai berikut:

$$\sum F = 0 ; \sum M = 0 \dots\dots\dots (2-1)$$

- Kompatibilitas perpindahan (*strain-displacement relation*)

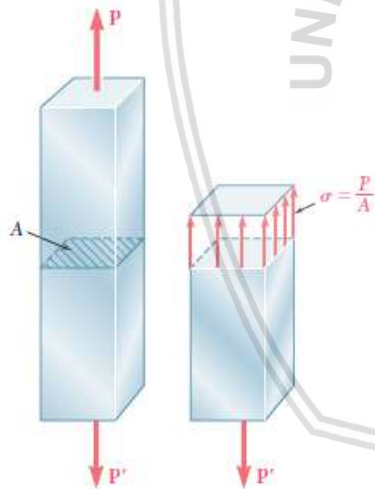
Regangan dan perpindahan pada bagian dari struktur serta nilainya diperlukan untuk mengetahui perubahan bentuk dalam struktur

- Hubungan konstitutif (*stress-strain-displacement*)

Tegangan dan regangan memiliki hubungan yang linier. Semakin besar regangan akan mempengaruhi nilai tegangan yang semakin besar pula. Gaya yang diberikan pada komponen berpengaruh terhadap perpindahan, regangan dan perpindahan

2.5.2. Konsep Tegangan dan Regangan

Tegangan adalah representasi dari nilai gaya per satuan luas permukaan tempat gaya pada benda bekerja. Umumnya terdapat dua kategori tegangan, berdasarkan arah gaya pada bidang permukaan yang bekerja, yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Gaya pada tegangan normal memiliki arah yang tegak lurus terhadap bidang permukaan yang dikenai gaya.



Gambar 2.17. Tegangan normal pada material akibat gaya normal

Sumber : Beer, (2012,p.7)

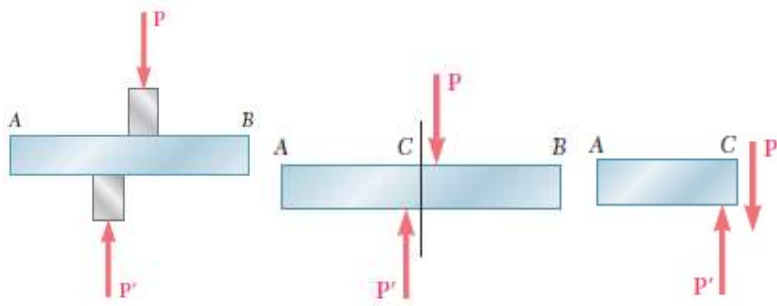
$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana : σ = Tegangan normal (N/mm²)

F = Gaya normal (N)

A = Luas permukaan pada material yang tegak lurus terhadap gaya (mm²)

Sedangkan gaya pada tegangan geser memiliki arah yang sejajar terhadap bidang permukaan yang dikenai gaya.



Gambar 2.18. Tegangan geser yang diakibatkan gaya geser pada material
Sumber : Beer, (2012,p.11)

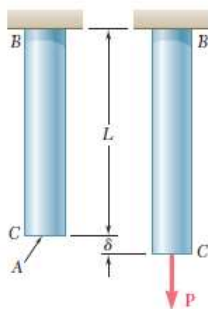
$$\tau = \frac{F_s}{A} \dots\dots\dots (2-3)$$

Dimana : τ = Tegangan geser (N/mm²)

F_s = Gaya geser (N)

A = Luas permukaan pada material yang sejajar terhadap gaya (mm²)

Saat suatu benda diberikan suatu gaya maka tegangan akan tercipta di elemen-elemen benda tersebut. Tegangan memiliki hubungan dengan regangan dapat dilihat pada persamaan (2-6). Regangan adalah suatu nilai antara perubahan nilai dimensi panjang suatu benda dibandingkan dengan panjang semula suatu benda. Terdapat dua jenis regangan berdasarkan gaya yang bekerja, yaitu regangan normal dan geser.



Gambar 2.19. Regangan yang terjadi akibat gaya
Sumber : Beer, (2012,p.55)

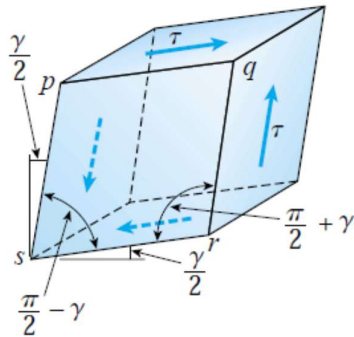
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \dots\dots\dots (2-4)$$

Dimana : ε = Regangan normal

δ = Deformasi (mm)

L_0 = Panjang awal (mm)

Sementara itu regangan geser adalah suatu perbandingan antara perubahan sudut dua permukaan tegak lurus dengan sudut awal dari benda benda.



Gambar 2.20. Contoh regangan geser pada material
Sumber : Gere (2004,p.32)

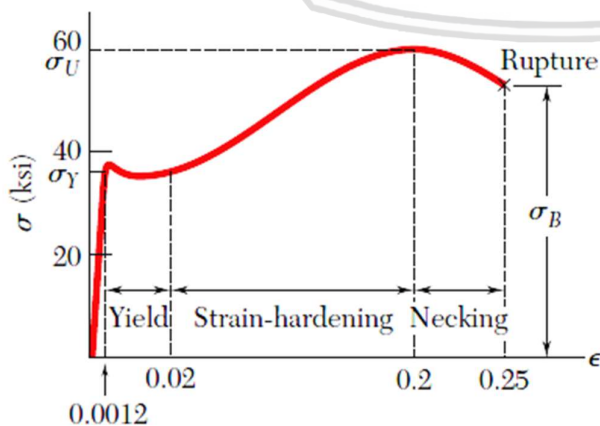
$$\gamma = \frac{S_s}{S_0} \dots \dots \dots (2-5)$$

Dimana : γ = Regangan geser

S_s = Perubahan sudut ($^\circ$)

S_0 = Sudut awal ($^\circ$)

Modulus elastisitas atau modulus young dari suatu materia adalah nilai perbandingan antara nilai dari tegangan normal dan nilai regangan normal. Modulus tersebut hanya berlaku pada daerah sebelum batas proporsional atau daerah deformasi elastis dari suatu material. Sedangkan rasio modulus geser adalah perbandingan antara nilai tegangan geser dengan nilai regangan geser material tersebut.



Gambar 2.21. Hubungan tegangan dengan regangan pada baja carbon rendah
Sumber : Beer (2012,p.58)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots \dots \dots (2-6)$$

Dimana : E = Modulus young [N/mm^2]

σ = Tegangan normal [N/mm^2]

ε = Regangan normal

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \dots \dots \dots (2-7)$$

Dimana : G = Modulus geser (N/mm^2)

τ = Tegangan geser (N/mm^2)

γ = Regangan geser

Terdapat fenomena ketika material dikenai pembebanan pada arah longitudinal maka akan terdapat regangan longitudinal dan transversal terhadap arah pembebanan. Nilai perbandingan dari hubungan antara regangan pada arah tegak lurus pembebanan (transversal) dengan regangan searah dengan pembebanan (longitudinal) disebut dengan rasio poisson (*Poisson's ratio*).

$$\nu = - \frac{\text{regangan transversal}}{\text{regangan longitudinal}} \dots \dots \dots (2-8)$$

Dimana : ν = Poisson's ratio

Hubungan antara modulus young material dengan modulus geser material terdapat pada persamaan berikut :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots \dots \dots (2-9)$$

Dimana : G = Modulus geser (N/mm^2)

E = Modulus young (N/mm^2)

ν = Poisson's ratio

2.5.3. Teori Deformasi

Deformasi pada mekanika struktur dapat direpresentasikan sebagai suatu perubahan bentuk struktur dari keadaan awal ke keadaan akhir. Konfigurasi berisi semua posisi partikel dari suatu struktur.

Deformasi terjadi disebabkan oleh suatu pembebanan terhadap struktur akibat beban dari gaya, beban dari *body force* (menopang beban berat struktur, beban dari luar struktur, dan lain-lain), pengaruh kelembapan, pengaruh temperature, pengaruh reaksi kimiawi, dan lain-lain.

Area dari deformasi pada struktur berasal dari distribusi tegangan yang diakibatkan oleh pembebanan dari gaya atau pembebanan yang berasal dari perubahan temperatur di struktur tersebut. Persamaan hubungan antara tegangan dengan regangan dijelaskan oleh Hukum *Hooke* khusus untuk material linear statis pada persamaan (2-10).

Terdapat dua jenis deformasi, yaitu deformasi secara elastis dan deformasi secara plastis. Deformasi elastis bekerja pada daerah elastis material, pada saat setelah beban dihilangkan struktur dapat kembali ke bentuk semula. Sedangkan deformasi plastis bekerja pada daerah plastis material, ketika beban dihilangkan struktur tidak akan bisa kembali ke bentuk semula.

Pada daerah elastis persamaan hubungan antara tegangan dan regangan dari hukum hooke dapat diaplikasikan terhadap struktur:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (2-10)$$

Dimana : σ = Tegangan dibebankan (Pa)

E = Modulus young (Pa)

ε = Regangan yang terjadi

Sedangkan persamaan hubungan antara regangan dan deformasi adalah:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \dots\dots\dots (2-11)$$

Dimana : ε = Regangan yang terjadi

δ = Deformasi elastis (mm)

L_0 = Panjang semula dari material (mm)

Berdasarkan persamaan 2-10 dan 2-11 maka didapatkan hubungan antara deformasi dengan modulus young material sebagai berikut:

$$\delta = \frac{F \cdot L_0}{A \cdot E} \dots\dots\dots (2-12)$$

Dimana : δ = Deformasi elastis (mm)

F = Gaya dari pembebanan (N)

L_0 = Panjang semula material (mm)

A = Luas yang terkena pembebanan (mm²)

E = Modulus young (MPa)

2.5.4. Teori Bending

Bending terjadi pada saat pembebanan gaya ataupun momen pada suatu struktur *beam* memiliki arah yang tegak lurus terhadap sumbu dari struktur tersebut (Gere, 2004). Dalam perencanaan *beam* gaya geser dan momen bending menjadi suatu hal yang penting. Biasanya kita hanya perlu tahu nilai terbesar dari gaya dan momen untuk mencari tegangan, defleksi dan *slope*. Untuk mencari nilai tegangan pada *beam* digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = -\frac{My}{I} \dots\dots\dots (2-13)$$

Dimana :

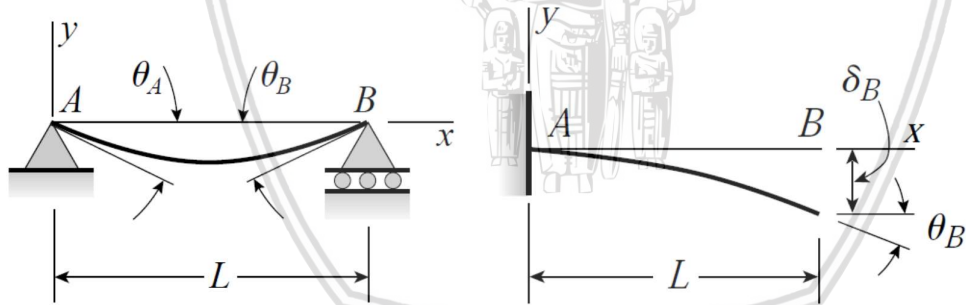
σ = tegangan

y = jarak terhadap sumbu netral

M = momen

I = momen inersia penampang

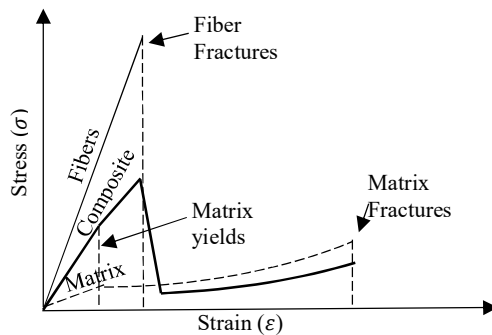
Terdapat beberapa cara untuk mencari gaya dan momen maksimal salah satunya adalah metode superposisi. Defleksi terbesar dari struktur *simple beam* terdapat diantara tumpuan dan untuk struktur *cantilever* terdapat pada ujung batang yang tidak terkena gaya



Gambar 2.22. Struktur *simple beam* (a) dan *cantilever* (b)

Sumber : Gere (2012)

2.6. Strength of Material



Gambar 2.23. Grafik hubungan tegangan dan regangan komposit jenis *continuous fiber* dengan *matrix*
Sumber : Ashby (1986,p.245)

Kekuatan (*strength*) dari material digunakan untuk mengetahui kemampuan dari struktur ketika menahan pembebanan. Kekuatan *yield* dari suatu batang adalah besaran beban yang akan mengakibatkan material mengalami *yield*, dan kekuatan *ultimate* merepresentasikan kekuatan maksimum yang mampu ditahan oleh material sebelum gagal/patah (gere,2004:16).

Tegangan *yield* dan tegangan *ultimate* dari material menjadi pertimbangan dalam perencanaan. Material harus berada pada daerah elastis yaitu dibawah tegangan *yield* material agar saat dikenai gaya struktur tidak terdeformasi plastis. Apabila melewati daerah elastis atau dengan kata lain diatas tegangan *yield* maka material akan mengalami deformasi plastis. Ketika material dikenai beban diatas kekuatan ultimatanya maka material akan mengalami suatu kegagalan material. Kegagalan yang terjadi biasanya terdapat pada daerah yang memiliki tegangan yang besar dan melewati kekuatan ultimatanya terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi lokasi terjadinya kegagalan material seperti besar pembebanan dan letak pembebanan, sambungan, lubang pada struktur, dimensi struktur, dan faktor lainnya. Nilai kekuatan material yang menjadi acuan dalam penelitian kali ini adalah kekuatan *ultimate*, karena struktur komposit akan langsung rusak setelah melewati kekuatan *ultimate*.

2.7. Tinjauan Elemen Hingga

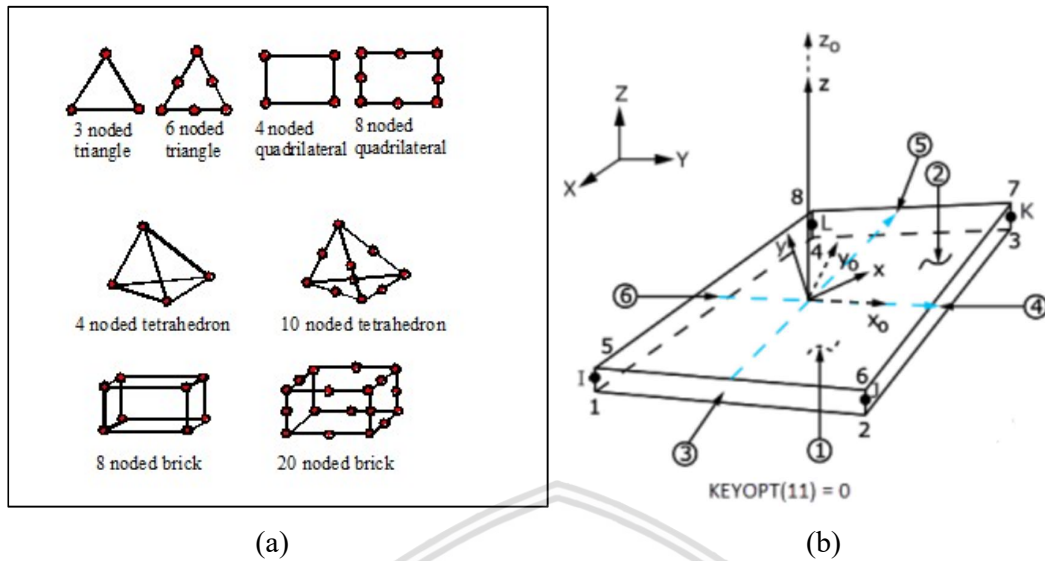
Metode Elemen hingga (*Finite Element Method*) atau kadang-kadang disebut dengan analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*) adalah suatu cara menggunakan teknik

komputasi untuk mendapatkan solusi pendekatan dari nilai dari suatu permasalahan dalam rekayasa teknik (Hutton, 2004). Cara yang digunakan dalam metode ini adalah dengan cara membagi benda yang akan menjadi beberapa bagian-bagian kecil hingga mencapai batas geometri benda. Metode ini dapat diterapkan pada permasalahan dalam bidang struktur, perpindahan kalor, aliran fluida, medan magnet dan lainnya. Pada bidang struktur, metode elemen hingga sudah berkembang untuk menyelesaikan permasalahan struktur statik, struktur dinamik, material linier ataupun non linier. Proses analisis elemen hingga secara umum memiliki tahapan seperti berikut:

1. Diskretisasi (*meshing*) dan pemilihan elemen

Diskretisasi merupakan suatu proses untuk membagi suatu struktur menjadi elemen-elemen kecil yang memiliki bentuk lebih sederhana hingga batas geometri benda tersebut. Elemen-elemen tersebut saling berhubungan pada *node* membentuk suatu geometri hingga mendekati bentuk struktur sebenarnya. Bentuk geometri struktur benda yang rumit disederhanakan pada proses diskretisasi untuk lebih mempermudah perhitungan dan akurasi data.

Untuk pemilihan jenis dan bentuk elemen yang digunakan bergantung pada karakteristik suatu benda yang akan dianalisa. Secara umum terdapat 3 jenis elemen berdasarkan analisa dimensinya yaitu *line element* untuk satu dimensi, *planar element* untuk dua dimensi dan *solid element* untuk tiga dimensi. Dalam penelitian ini digunakan element “shell 181” yang masuk dalam jenis *planar element*. Jenis *planar element* cocok untuk analisa suatu permukaan yang memiliki ketebalan (ANSYS 18.2). Terdapat beberapa bentuk elemen berdasarkan dimensinya untuk dua dimensi dapat menggunakan elemen segitiga dan *quadrilateral*, sedangkan struktur tiga dimensi dapat menggunakan elemen *heksahedron* dan *tetrahedron*.



Gambar 2.24. (a) Macam – macam elemen, (b) Elemen Shell 181
Sumber: Nath (2015)

2. Memilih fungsi pendekatan
3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan, terdapat beberapa jenis matrik kekakuan tergantung dengan analisisnya. Sebagai contoh berikut adalah persamaan matriks kekakuan pada pegas:

$$[Ke] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-14)$$

Dimana:

$[Ke]$ = matrik kekakuan pegas

k = konstanta pegas

4. Menentukan matrik beban total,
5. Merakit elemen menjadi struktur, lalu menentukan matrik kekakuan global.
6. Mendapatkan perpindahan global, untuk mendapatkan perpindahan dapat melalui persamaan hukum hooke.

$$[K]\{u\} = \{F\} \dots\dots\dots (2-15)$$

Lalu didapatkan persamaan:

$$\{u\} = \{F\}[K]^{-1} \dots\dots\dots (2-16)$$

Dimana:

$[K]$ = matrik kekakuan global

$\{u\}$ = perpindahan node

$\{F\}$ = beban

7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

2.7.1. Orthotropic Material

Pada material *Orthotropic* terdapat tiga bidang orthogonal simetri, memiliki perbedaan sifat material pada tiap sumbu. Komposit, secara umum memiliki sifat material berbeda pada setiap arah. Berikut hubungan tegangan dan regangan pada material komposit dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k(\{\epsilon^0\} + z\{\kappa\}) \dots\dots\dots (2-17)$$

Dimana:

- $\{\sigma\}_k$ = tegangan pada lamina k
- $[\bar{Q}]_k$ = transformasi *matrix* kekakuan lamina
- $\{\epsilon^0\}$ = regangan
- z = koordinat terluar lamina terhadap sumbu tengah
- $\{\kappa\}$ = kelengkungan

Pada material *orthotropic* sifat material didasarkan terhadap tiga arah principle. Hukum *specialy orthotropic* pada material berlaku.

Matrix kekakuan lamina dari *carbon fiber* dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-18)$$

Dimana:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \dots\dots\dots (2-19)$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \dots\dots\dots (2-20)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \dots\dots\dots (2-21)$$

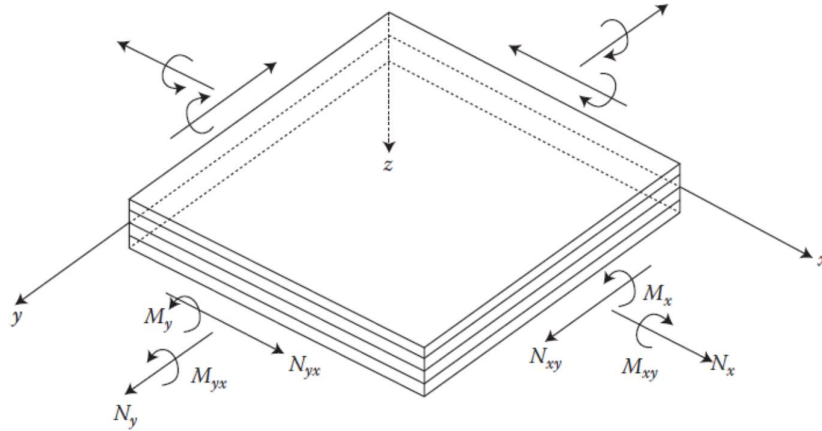
$$Q_{66} = E_{12} \dots\dots\dots (2-22)$$

E_1 = Modulus Young *Longitudinal*

E_2 = Modulus Young Transverse

ν_{12} = Poisson Ratio bidang 1-2

G_{12} = Modulus Geser Bidang 1-2



Gambar 2.25. Sudut orientasi ply
Sumber : Gibson (2012,p.298)

Pengaruh sudut orientasi ply terhadap matriks kekakuan dijelaskan pada persamaan dibawah:

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][T] \dots\dots\dots (2-23)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-24)$$

$$c = \cos(\theta), s = \sin(\theta) \dots\dots\dots (2-25)$$

Matriks ABD adalah matriks 6x6 yang menghubungkan hubungan regangan dan gaya yang diberikan pada laminasi. Matriks tersebut menjelaskan kekakuan dari seluruh laminasi komposit.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \dots\dots\dots (2-26)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \dots\dots\dots (2-27)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \dots\dots\dots (2-28)$$

Berikut adalah matrix gabungan [A], [B] dan [D], atau disebut dengan matriks [ABD]:

$$[ABD] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-29)$$

Hubungan matriks ABD dengan regangan dijelaskan pada persamaan berikut:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2-30)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2-31)$$

Berikut adalah material properties dari material *Epoxy Carbon fiber*, Resin dan *Honeycomb Composite* :

Tabel 2.5.
Material Properties Epoxy Carbon Woven
Material Properties Chassis

<i>Modulus Young (MPa) X Direction</i>	70000
<i>Modulus Young (MPa) Y Direction</i>	70000
<i>Modulus Young (MPa) Z Direction</i>	7500
<i>Poisson's Ratio XY</i>	0,1
<i>Poisson's Ratio YZ</i>	0,3
<i>Poisson's Ratio XZ</i>	0,3
<i>Tensile Strength X Direction (MPa)</i>	600
<i>Tensile Strength Y Direction (MPa)</i>	600
<i>Tensile Strength Z Direction (MPa)</i>	50
<i>Compressive Strength X Direction (MPa)</i>	-570
<i>Compressive Strength Y Direction (MPa)</i>	-570
<i>Compressive Strength Z Direction (MPa)</i>	-150
<i>Shear Modulus XY (MPa)</i>	5000
<i>Shear Modulus YZ(MPa)</i>	2700
<i>Shear Modulus XZ (MPa)</i>	2700

Sumber: *ACP Composites*

Tabel 2.6.
Material Properties Core Honeycomb
Material Properties Chassis

<i>Modulus Young (MPa) X Direction</i>	1
<i>Modulus Young (MPa) Y Direction</i>	1
<i>Modulus Young (MPa) Z Direction</i>	1275.5
<i>Poisson's Ratio XY</i>	0,49
<i>Poisson's Ratio YZ</i>	0,001
<i>Poisson's Ratio XZ</i>	0,001
<i>Tensile Strength X Direction (MPa)</i>	0
<i>Tensile Strength Y Direction (MPa)</i>	0
<i>Tensile Strength Z Direction (MPa)</i>	5,31
<i>Compressive Strength X Direction (MPa)</i>	0
<i>Compressive Strength Y Direction (MPa)</i>	0
<i>Compressive Strength Z Direction (MPa)</i>	3,275
<i>Shear Modulus XY (MPa)</i>	0
<i>Shear Modulus YZ (MPa)</i>	193
<i>Shear Modulus XZ (MPa)</i>	482.63

Sumber: Hexcell Data Sheet

2.7.2. Software FEA

Software yang berbasis *Finite Element Analysis (FEA)* memiliki keunggulan yaitu kemampuan mendiskritisasi model geometri dengan sangat halus, dapat bekerja dengan jumlah elemen yang banyak dan dapat menghasilkan hasil dengan ketelitian tinggi, selain itu dapat menganalisa permasalahan dalam bidang struktur, thermal, elektromagnetik, dan fluida.

Secara umum langkah – langkah analisis dengan menggunakan *software* berbasis *FEA* dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. Preprocessing (proses awal)

Tahapan penting dalam *reprocessing* :

- a. Menentukan domain permasalahan geometri
- b. Menentukan jenis elemen
- c. Menentukan properti material

- d. Menentukan pemodelan geometri
- e. Mendiskritisasi (meshing) model geometri
- f. Menentukan suatu kondisi batas permasalahan
- g. Menentukan pembebanan (*load case*)

2. *Solution* (proses solusi)

Pada tahapan ini terjadi perhitungan untuk solusi atau hasil dari permasalahan yang sudah ditentukan. Seperti menentukan reaksi gaya, tegangan pada elemen dan perpindahan panas

3. *Postprocessing*

a. *Plot result*

Menampilkan hasil distribusi tegangan atau variabel lainnya pada model dalam bentuk *countour plot* sehingga mudah untuk menyajikan informasi yang didapatkan.

b. *List result*

Menampilkan hasil analisis dalam bentuk *list result* yang berupa tabel untuk memberikan informasi secara detail mengenai hasil yang didapat.

c. *Animation*

Menampilkan hasil analisis terhadap waktu dalam bentuk animasi.

2.7.3. Failure Analysis

Reserve Factor (RF) merupakan nilai perbandingan dari beban kegagalan material dan beban yang diberikan pada material. *Inverse reserve factor* (IRF) adalah kebalikan dari RF, nilai dari IRF dapat menunjukan kegagalan material. Material dikatakan gagal apabila nilai dari IRF lebih dari 1. Nilai IRF diambil dari perhitungan pada elemen dengan membandingkan nilai terbesar dari perbandingan beban prinsipal dan beban maksimal komposit.

Kriteria tegangan von mises dapat digunakan pada *ply* komposit untuk melihat tegangan pada setiap lapisan *ply*. Tegangan von mises adalah teori distorsi energi maksimum pada material. Tegangan von mises dapat digunakan untuk mengetahui titik tegangan terbesar pada material.

$$RF = \frac{\sigma_f}{\sigma_{applied}} \dots\dots\dots (3-32)$$

$$IRF = \frac{1}{RF} \dots\dots\dots (3-33)$$

Dimana :

σ_f = tegangan maksimal material

$\sigma_{applied}$ = tegangan yang diberikan

a. *Maximum stresss criterion*

Dalam kriteria kegagalan *maximum stresss* (tegangan maksimum), rasio tegangan aktual terhadap tegangan kegagalan dibandingkan dalam sistem koordinat utama *ply*. Dengan demikian, fungsi kriteria kegagalan ditulis sebagai berikut :

$$f = \max \left(\left| \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| \frac{\sigma_3}{Z} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S} \right|, \left| \frac{\tau_{13}}{R} \right|, \left| \frac{\tau_{23}}{Q} \right| \right) \dots\dots\dots (2-34)$$

b. *Maximum strain criterion*

Dalam kriteria kegagalan *maximum strain* (regangan maksimum), rasio strain aktual terhadap regangan kegagalan dibandingkan dalam sistem koordinat utama *ply*. Fungsi kriteria kegagalan ditulis sebagai berikut :

$$f = \max \left(\left| \frac{\varepsilon_1}{X_\varepsilon} \right|, \left| \frac{\varepsilon_2}{Y_\varepsilon} \right|, \left| \frac{\varepsilon_3}{Z_\varepsilon} \right|, \left| \frac{\gamma_{12}}{S_\varepsilon} \right|, \left| \frac{\gamma_{13}}{R_\varepsilon} \right|, \left| \frac{\gamma_{23}}{Q_\varepsilon} \right| \right) \dots\dots\dots (2-35)$$

2.7.4. Hipotesis

Setelah melakukan tinjauan pustaka, dapat diambil hipotesis bahwa terdapat pengaruh variasi sudut orientasi *ply carbon fiber* pada struktur *monocoque chassis carbon fiber honeycomb core composite* terhadap distribusi tegangan dan deformasi. Setelah mendapatkan hasil distribusi tegangan dan deformasi maka dapat ditinjau model terbaik yang dapat dipakai untuk mobil hemat energi.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah dengan cara metode simulasi pada struktur desain chassis menggunakan *software* yang berbasis *Finite Element Analysis*. Yaitu dengan melakukan pengamatan dan analisis metode elemen hingga untuk mencari data sebab dan akibat oleh sesuatu pembebanan dan disimulasikan menggunakan *software* ANSYS 18.2 untuk mendapatkan data hasil penelitian.

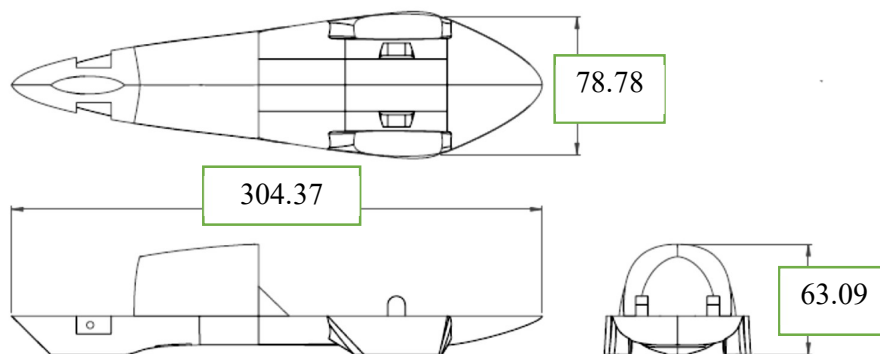
3.2. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Waktu penelitian dimulai dari bulan Februari sampai dengan selesai.

3.3. Variabel Penelitian

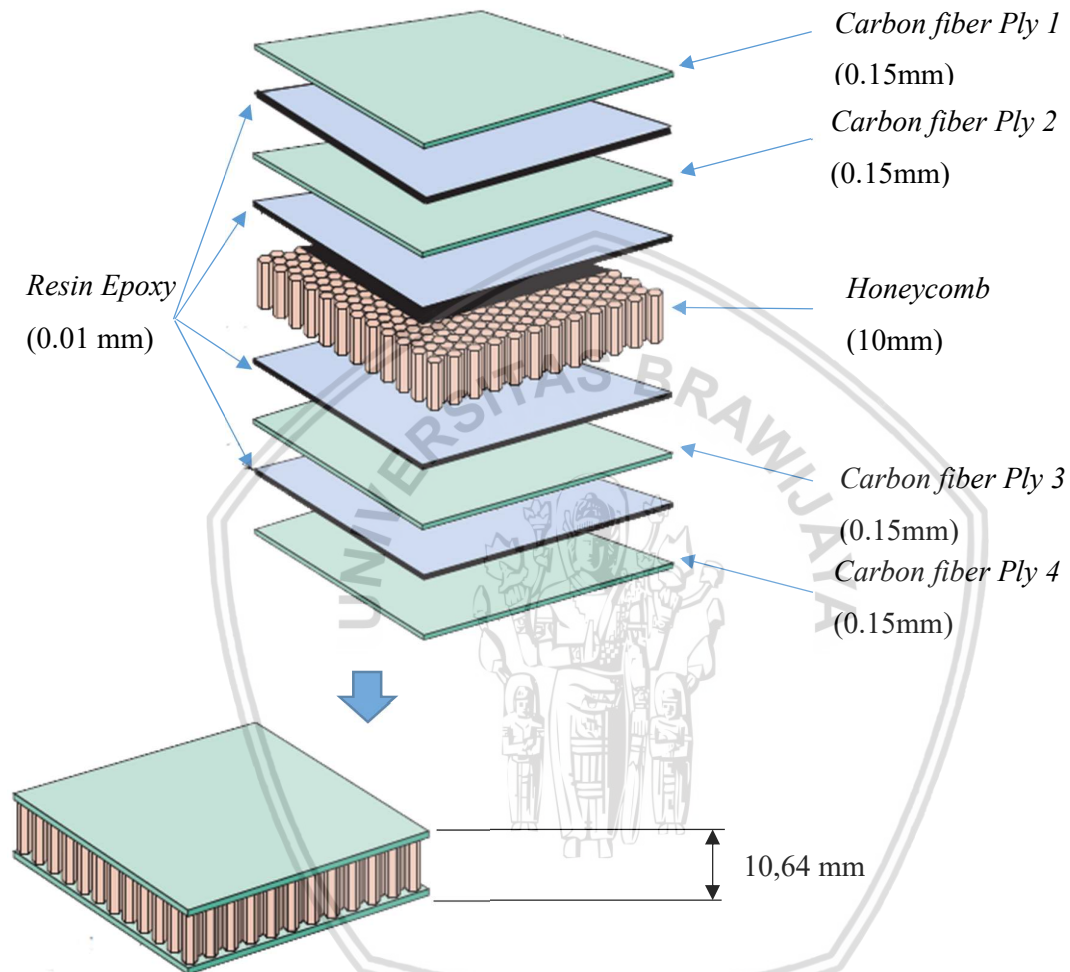
3.3.1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah sudut orientasi material komposit *Carbon fiber*. Geometri *chassis* ditentukan berdasarkan desain mobil hemat energi “Aristo Evo 7” tipe prototipe milik Apatte 62 Brawijaya Team yang dibuat dan dimodifikasi dengan *software* CAD dan di impor ke modeller *software* berbasis *FEM*.

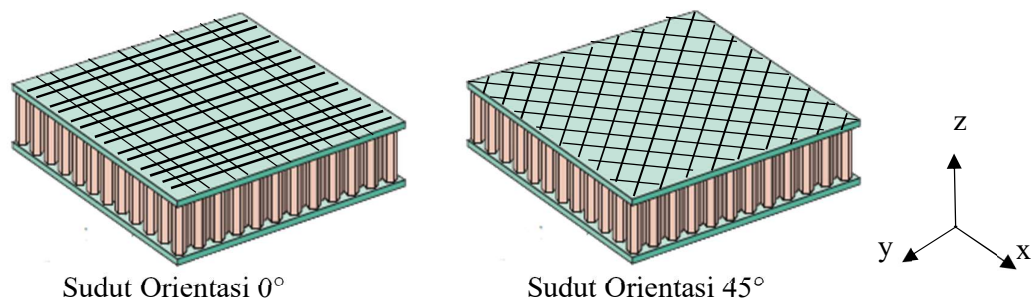


Gambar 3.1. Desain chasis *monocoque* aristo evo – 5
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Dalam penelitian ini, digunakan enam variasi model sudut orientasi dengan ketebalan lapisan *fiber* dan *core* yang sama. Model dijelaskan melalui Gambar 3.2 dan Tabel 3.1 dibawah.



Gambar 3.2. Carbon fiber honeycomb core



Gambar 3.3. Sudut orientasi carbon fiber terhadap sumbu x pada bidang x-y sandwich composite

Tabel 3.1. Variasi Sudut Orientasi *Carbon fiber*

<i>Ply</i>	Model 1 [45/45/ \overline{core}] _s	Model 2 [0/0/ \overline{core}] _s	Model 3 [45/45/ <i>core</i> / 0/0]	Model 4 [0/0/ <i>core</i> / 45/45]	Model 5 [45/0/ \overline{core}] _s	Model 6 [0/45/ \overline{core}] _s
1	45	0	45	0	45	0
2	45	0	45	0	0	45
	<i>Core</i>	<i>Core</i>	<i>Core</i>	<i>Core</i>	<i>Core</i>	<i>Core</i>
3	45	0	0	45	0	45
4	45	0	0	45	45	0

3.3.2. Variabel Terikat

Variabel yang terikat pada penelitian ini adalah distribusi tegangan dan deformasi pada *chassis* terhadap gaya uji *torsional* dan *vertical bending*.

3.3.3. Variabel Terkontrol

Variabel kontrol yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material komposit

a. *Epoxy carbon fiber woven*

- Tensile Strength* sumbu X : 600 MPa
Tensile Strength sumbu Y : 600 MPa
Tensile Strength sumbu Z : 50 MPa
Compressive Strength sumbu X : -570 MPa
Compressive Strength sumbu Y : -570 MPa
Compressive Strength sumbu Z : -150 MPa
Modulus Elastisitas (E) sumbu X : 70000 MPa
Modulus Elastisitas (E) sumbu Y : 70000 MPa
Modulus Elastisitas (E) sumbu Z : 7500 MPa
Modulus Geser (G) sumbu XY : 5000 MPa
Modulus Geser (G) sumbu YZ : 2700 MPa
Modulus Geser (G) sumbu XZ : 2700 MPa

b. *Aluminum Honeycomb*

- Tensile Strength* sumbu X : 0 MPa
Tensile Strength sumbu Y : 0 MPa

<i>Tensile Strength</i> sumbu Z	: 5,31 MPa
<i>Compressive Strength</i> sumbu X	: 0
<i>Compressive Strength</i> sumbu Y	: 0
<i>Compressive Strength</i> sumbu Z	: -3,275 MPa
Modulus Elastisitas (E) sumbu X	: 1 MPa
Modulus Elastisitas (E) sumbu Y	: 1 MPa
Modulus Elastisitas (E) sumbu Z	: 1275,53 MPa
Modulus Geser (G) sumbu XY	: 10^{-6} MPa
Modulus Geser (G) sumbu YZ	: 193,05 MPa
Modulus Geser (G) sumbu XZ	: 482,63 MPa

c. *Resin Epoxy*

<i>Tensile Yield Strength</i>	: 54,6 MPa
Modulus Elastisitas (E)	: 3780 MPa
Modulus Geser (G)	: 1400 MPa

2. Berat pengemudi : 60 kg
3. Berat mesin dan komponen : 20 kg
4. Gravitasi = 10 m/s^2
5. *Safety factor* = 1.5
6. Standar pengujian menggunakan *static structural*

3.4. *Meshing*

Meshing merupakan proses pembagian desain menjadi elemen-elemen yang berjumlah (hingga). Pada penelitian ini, element yang digunakan adalah shell 181 dikarenakan cocok untuk menganalisis struktur cangkang yang memiliki ketebalan sedang selain itu dapat digunakan untuk material komposit dan struktur *sandwich* (ANSYS 18.2). Ukuran *meshing* (elemen) yang digunakan pada ANSYS Workbench 18.2 adalah sebesar 10 mm dengan metode all triangles (elemen berbentuk segitiga) berjumlah 71200 elemen dengan node berjumlah 36245. Semakin kecil ukuran *meshing* akan menghasilkan hasil yang semakin akurat.



Gambar 3.4. Meshing model

3.5. Pengaturan Pembebanan

Pembebanan yang digunakan adalah hasil tekanan dari gaya berat komponen yang menempel pada *chassis* termasuk gaya berat *chassis* itu sendiri dan gaya pengujian. Perhitungan gaya berat dalam penelitian ini ditentukan dengan rumus :

$$W = m \cdot g \dots\dots\dots (3-1)$$

Keterangan:

W = Gaya berat (N)

m = massa benda (Kg)

g = gravitasi (m/s^2)

Berikut adalah perhitungan pada gaya berat tiap variabel terkontrol yang digunakan dalam penelitian ini :

1. Gaya berat pengemudi

$$W_{driver} = m_{driver} \cdot g \cdot SF \dots\dots\dots (3-2)$$

$$W_{driver} = 60 \text{ Kg} \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,5 \dots\dots\dots (3-3)$$

$$W_{driver} = 900 \text{ N} \dots\dots\dots (3-4)$$

2. Gaya berat *engine*

$$W_{engine} = m_{driver} \cdot g \cdot SF \dots\dots\dots (3-5)$$

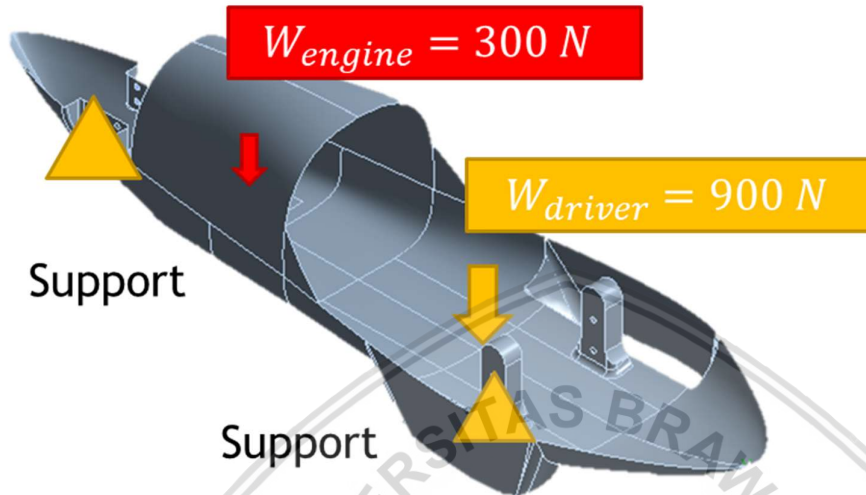
$$W_{engine} = 20 \text{ Kg} \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,5 \dots\dots\dots (3-6)$$

$$W_{engine} = 300 \text{ N} \dots\dots\dots (3-7)$$

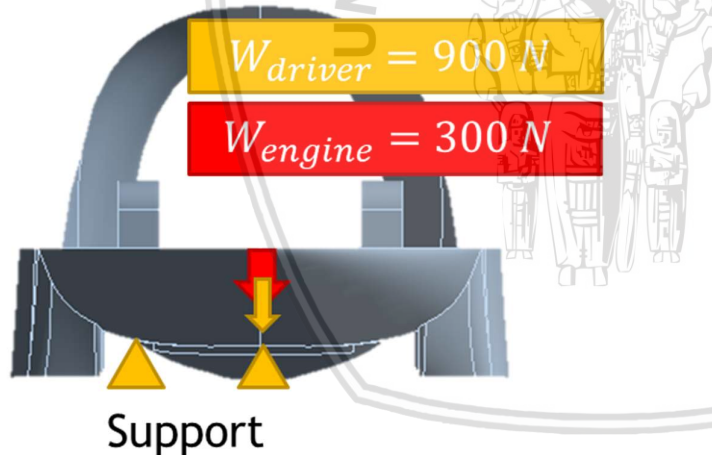
3.5.1. Torsional

Gaya yang terjadi akibat gaya *Torsional* berasal dari salah satu roda pada kendaraan ketika melewati permukaan yang tidak sejajar. Maka dalam kasus ini salah satu tumpuan

poros roda depan masuk kedalam lubang secara bebas sehingga memberikan gaya torsi pada arah *longitudinal* kendaraan. Penempatan gaya dan tumpuan dijelaskan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6



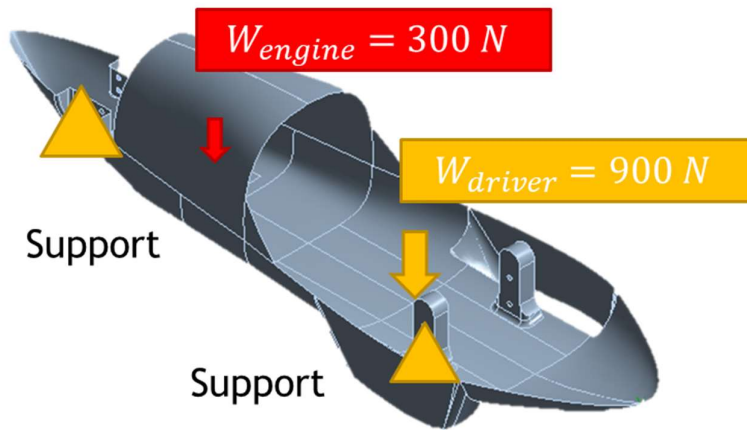
Gambar 3.5. Torsional



Gambar 3.6. Torsional tampak depan

3.5.2. Vertical bending

Gaya yang terjadi akibat *vertical bending* berasal dari beban komponen dan pengemudi pada kendaraan. Penempatan gaya dan tumpuan dijelaskan pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8



Gambar 3.7. Vertical bending

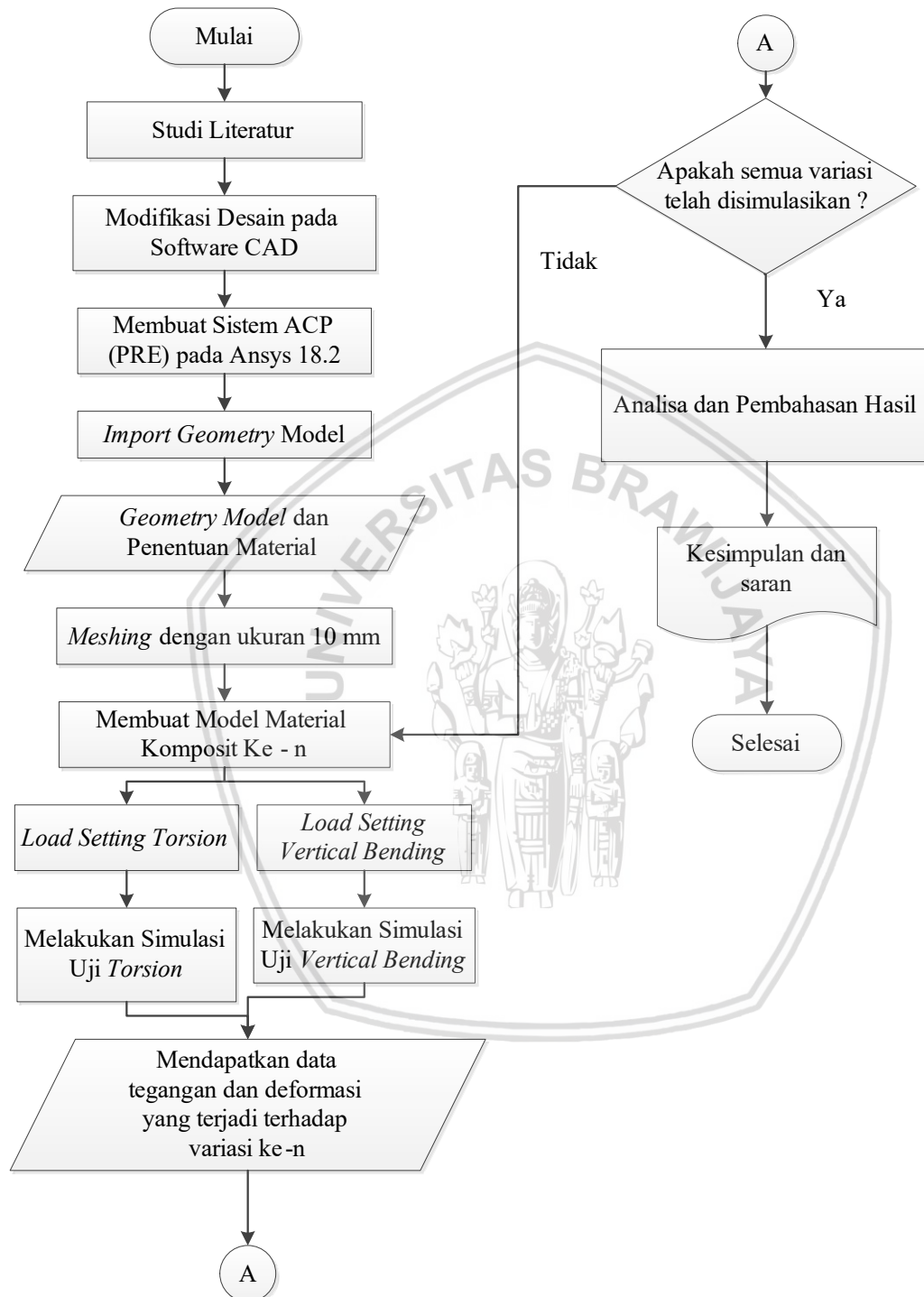


Gambar 3.8. Vertical bending tampak samping

3.6. Prosedur Penelitian

1. Geometri ditentukan berdasarkan model *chassis* dari Aristo Evo V milik Apatte 62 Brawijaya
2. Dari data geometri yang didapat, permodelan dibuat dan dirangkai pada *software* CAD Solidwork 2017
3. Model rangkaian diimport dan akan disimulasikan pada *software* berbasis FEA ANSYS 18.2
4. Meshing model dilakukan di *software* ANSYS 18.2
5. Simulasi material komposit menggunakan ACP(pre) dengan variasi sudut orientasi *carbon fiber*
6. Mentransfer hasil simulasi material ke sistem *static structural* dengan pembebanan torsion dan *static structural* dengan pembebanan *vertical bending*
7. Memulai simulasi pada *torsion* dan *vertical bending*
8. Hasil simulasi *equivalent stress*, *total deformation* dan kegagalan yang telah di proses oleh *software* dianalisa dan diolah untuk mendapatkan tujuan penelitian

3.7. Flowchart



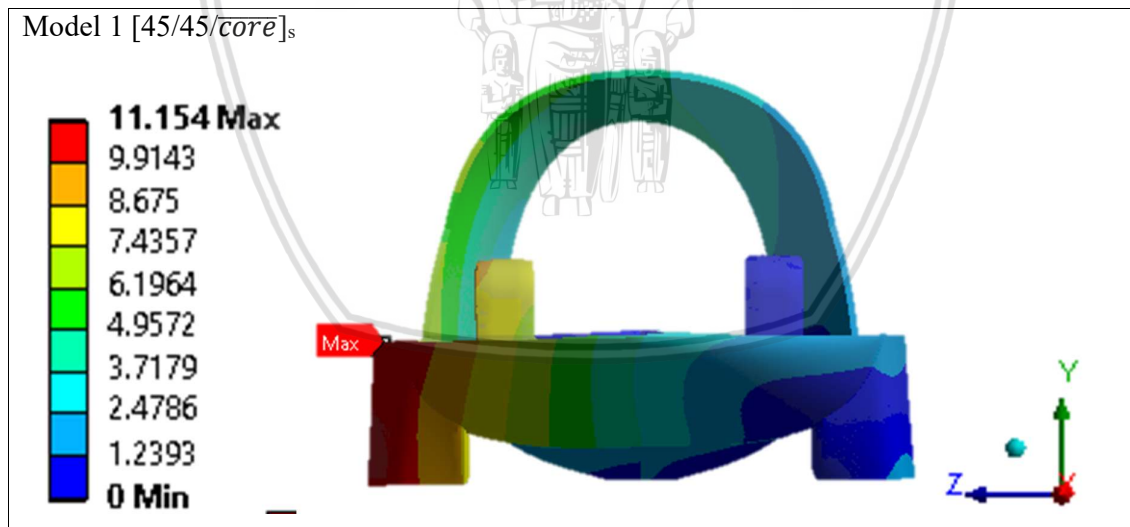
Gambar 3.9. Flowchart

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

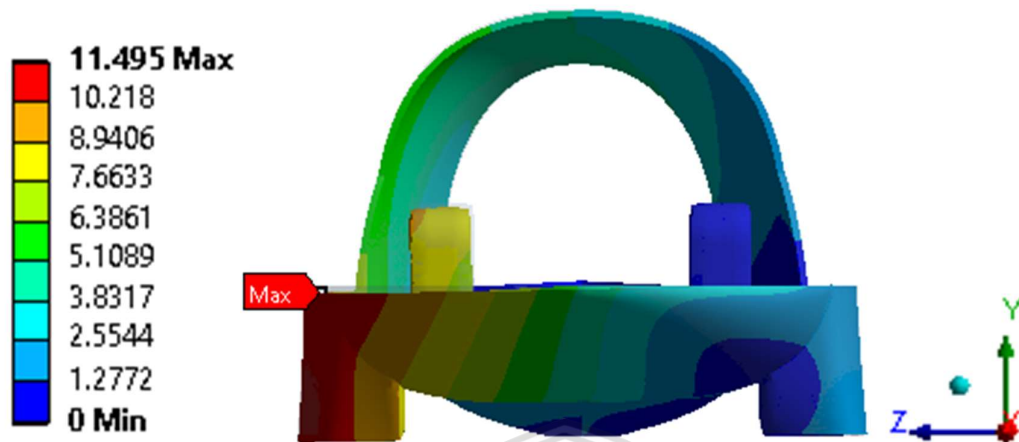
4.1. Hasil Pengujian

4.1.1 Deformasi pada *Chassis*

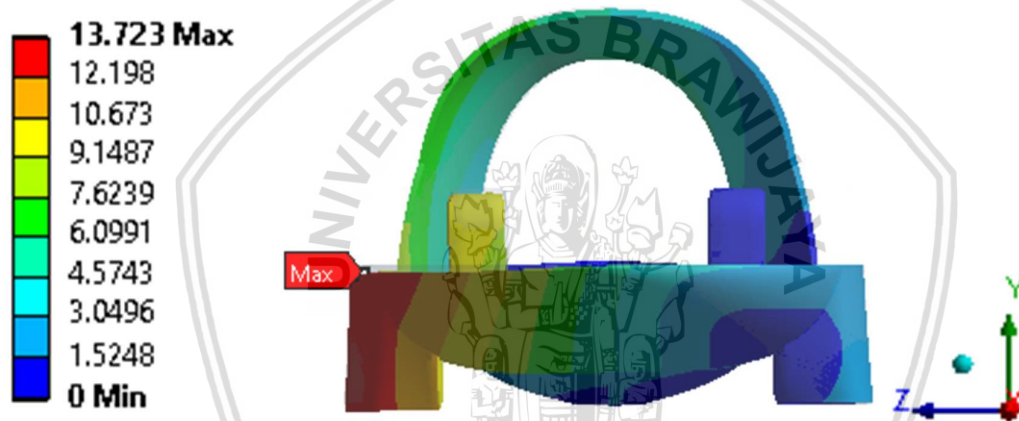
Pengujian pembebanan *torsional* adalah satu kondisi pembebanan pada saat salah satu dari roda kendaraan memiliki perbedaan ketinggian disaat roda yang lain tetap pada posisinya sehingga memberikan gaya torsi pada arah *longitudinal*, dalam kasus ini salah satu roda masuk kedalam lubang sehingga poros dibebaskan. Pembebanan berikan terhadap 6 model *chassis* dengan variasi sudut orientasi pada lamina *carbon fiber*. Penyebaran deformasi pada setiap model secara kasat mata tampak mirip, deformasi terbesar terjadi pada kulit terluar dari *chassis* mobil yang dikenai beban torsi fenomena ini sesuai dengan fenomena pada *cantilever beam* saat dikenai gaya. Deformasi pada setiap model *chassis* mobil dapat dijelaskan pada Gambar 4.1



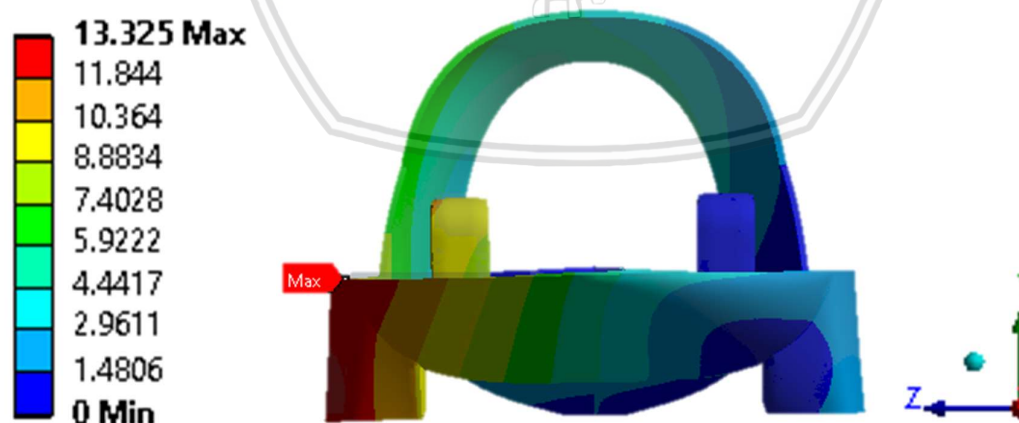
Model 2 $[0/0/\text{core}]_s$

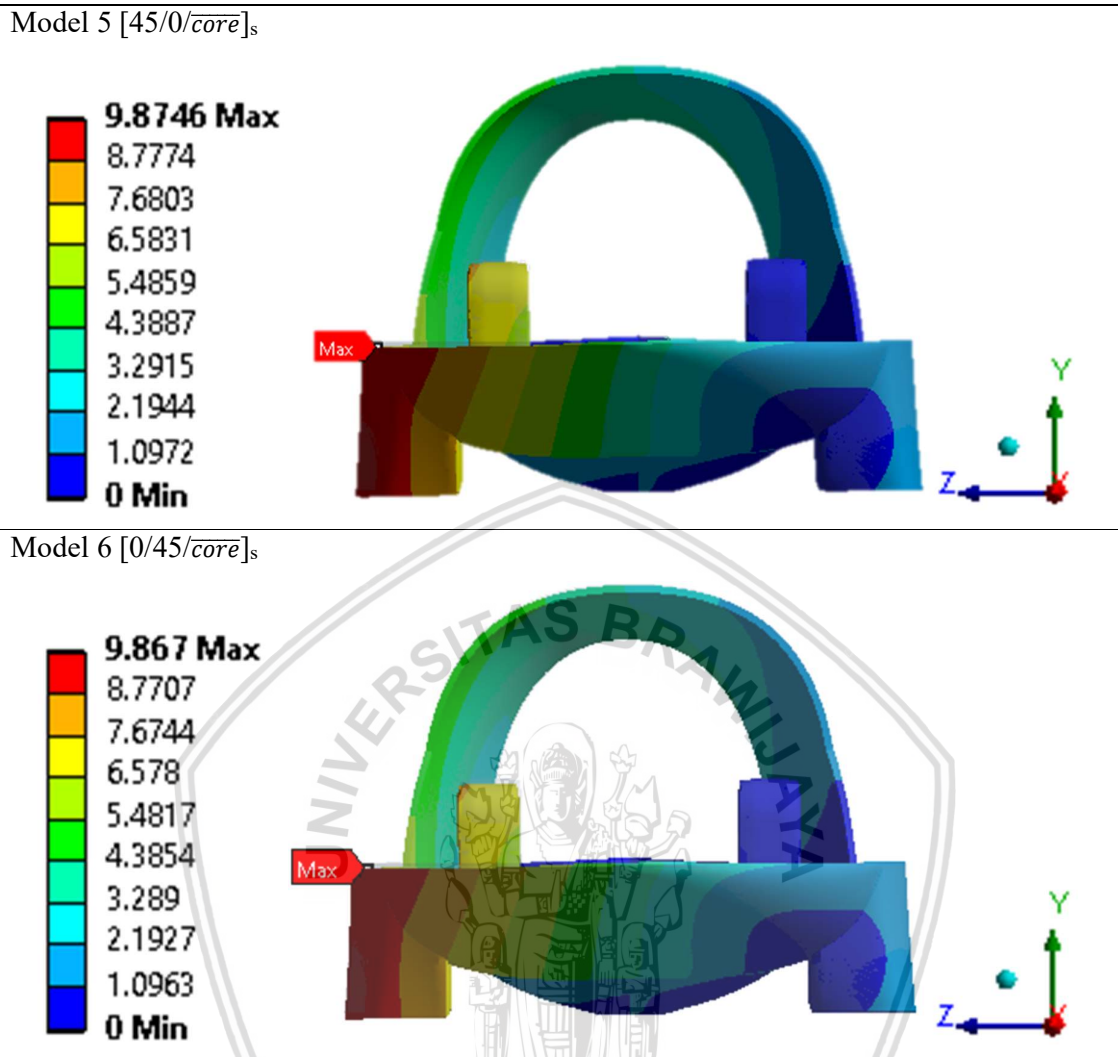


Model 3 $[45/45/\text{core}/0/0]$



Model 4 $[0/0/\text{core}/45/45]$





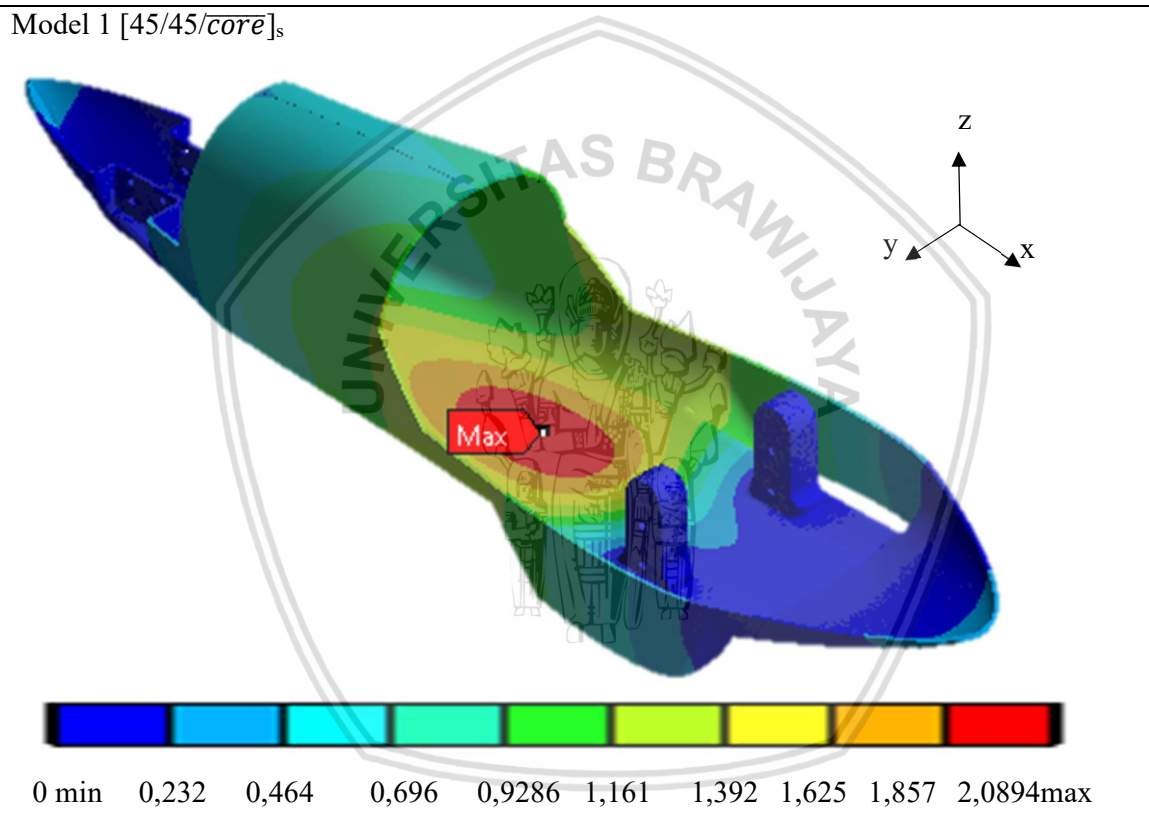
Gambar 4.1. Deformasi pada *chassis* pembebanan *torsional* dalam satuan millimeter (mm)

Uji pembebanan *torsional* dilakukan agar dapat mengetahui karakteristik struktur *chassis* ketika dikenai gaya torsi yang diakibatkan oleh salah satu roda yang menumbuk permukaan jalan yang tidak rata.

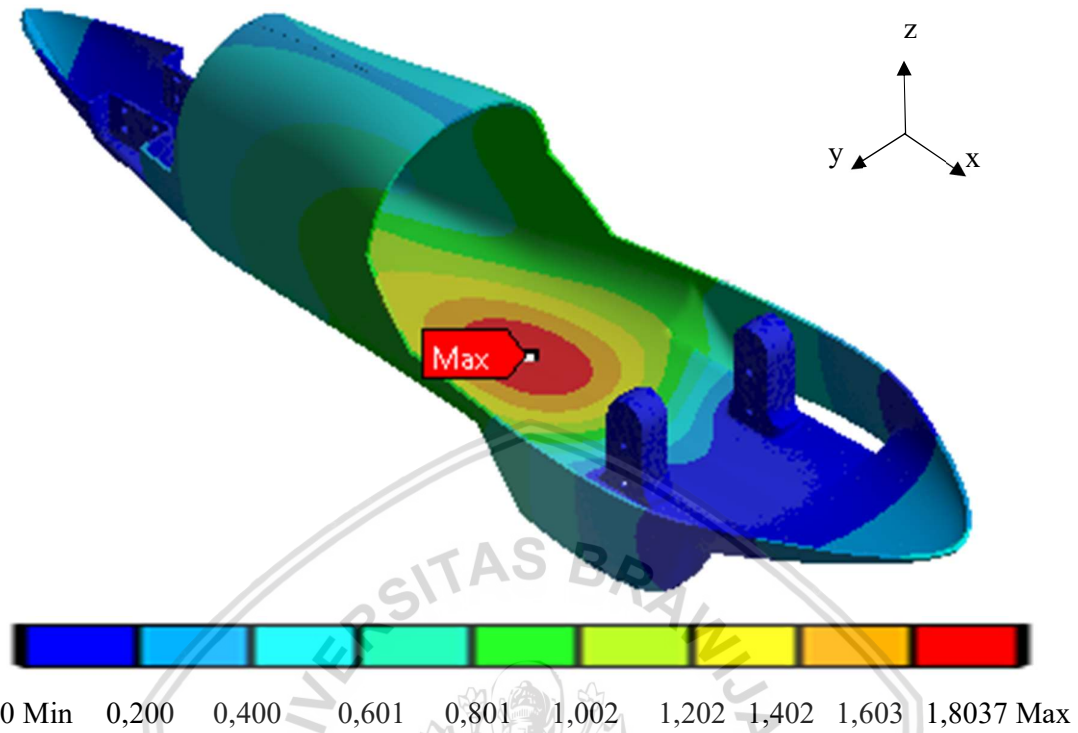
Gambar 4.1 menjelaskan perbandingan deformasi total uji pembebanan *torsional* pada setiap model. Deformasi total maksimal pada model ke-1 bernilai 11,154 mm, model ke-2 bernilai 11,495 mm, model ke-3 bernilai 13,723 mm, model ke-4 bernilai 13,325 mm, model ke-5 bernilai 9,875 mm dan model ke-6 bernilai 9,867 mm. Pada model ke-3 dengan konfigurasi $[45/45/\overline{core}/0/0]$ memiliki deformasi paling tinggi dengan nilai 13,723 mm. Sedangkan nilai terendah pada model ke-6 dengan konfigurasi $[0/45/\overline{core}]_s$ dengan nilai 9,867 mm.

Pengujian pembebanan *vertical bending* adalah satu kondisi pembebanan pada saat kendaraan dalam keadaan diam dan menahan beban. Pengujian *vertical bending*

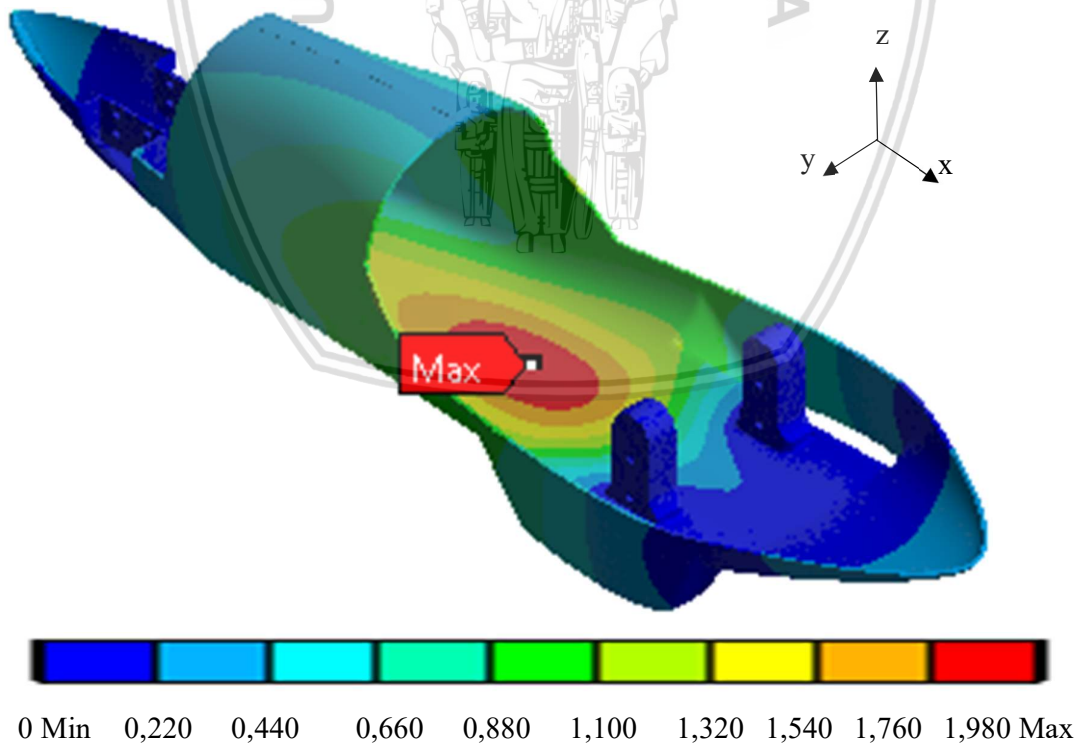
dilakukan pada 6 model *chassis* dengan variasi sudut orientasi pada *layer carbon fiber*. Deformasi terbesar terdapat pada model ke-1 dan deformasi terkecil terdapat pada model ke-6. Penyebaran deformasi pada setiap model memiliki kontur yang hampir sama, deformasi terbesar terjadi pada bagian tengah *chassis* yang diakibatkan oleh pembebanan dari berat pengemudi dan berat engine, fenomena ini mirip dengan fenomena pada *Simple Beam* ketika dikenai gaya bending. Untuk deformasi terkecil berada disekitar daerah *fix support* yaitu pada bagian tumpuan poros roda belakang dan roda depan. Deformasi pada setiap model *chassis* mobil dapat dijelaskan pada Tabel 4.2



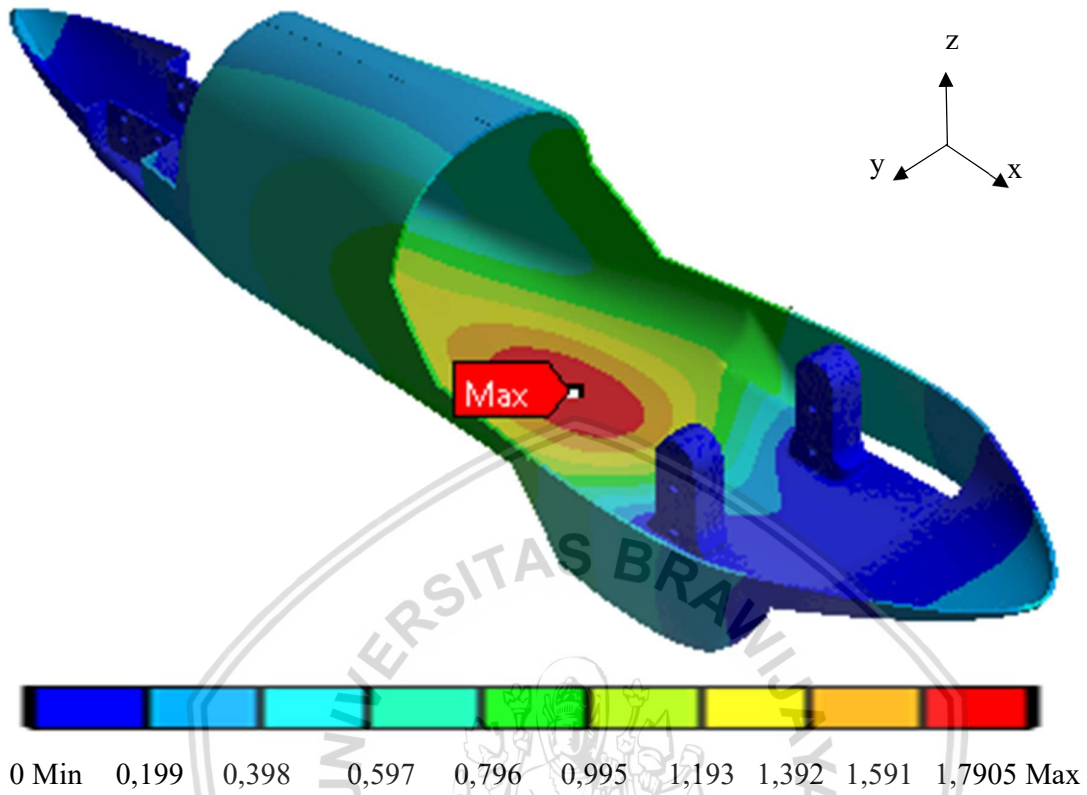
Model 2 $[0/0/\text{core}]_s$



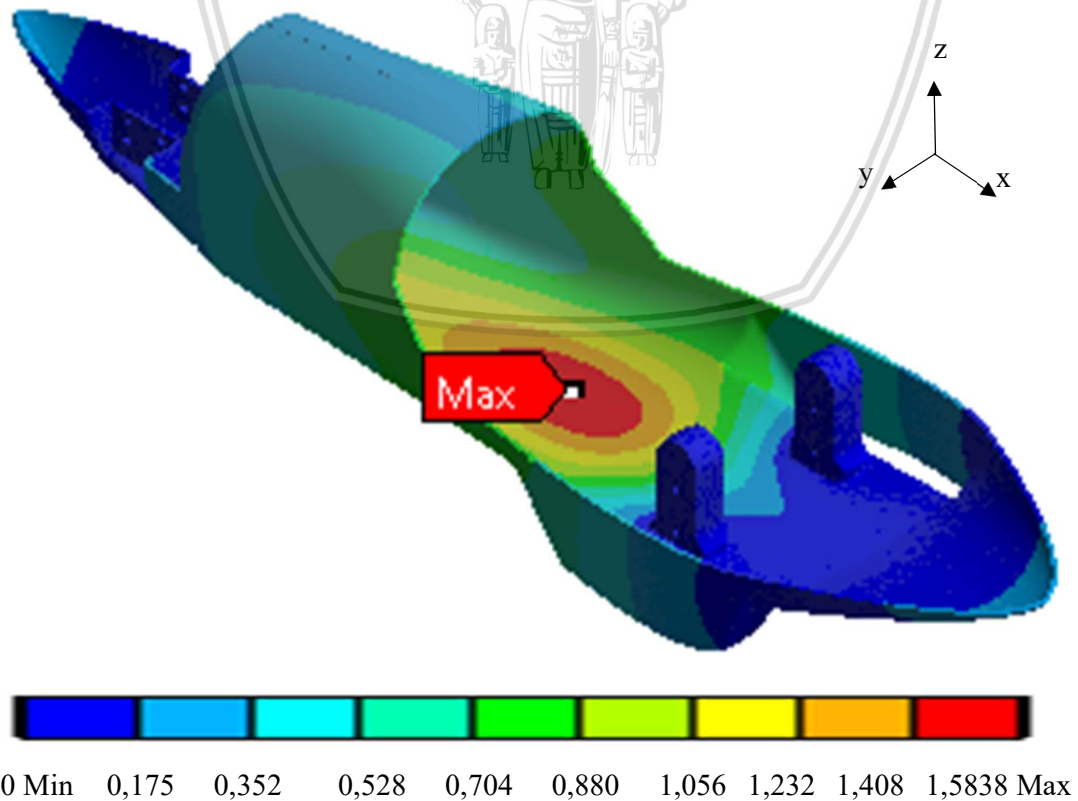
Model 3 $[45/45/\text{core}/0/0]$

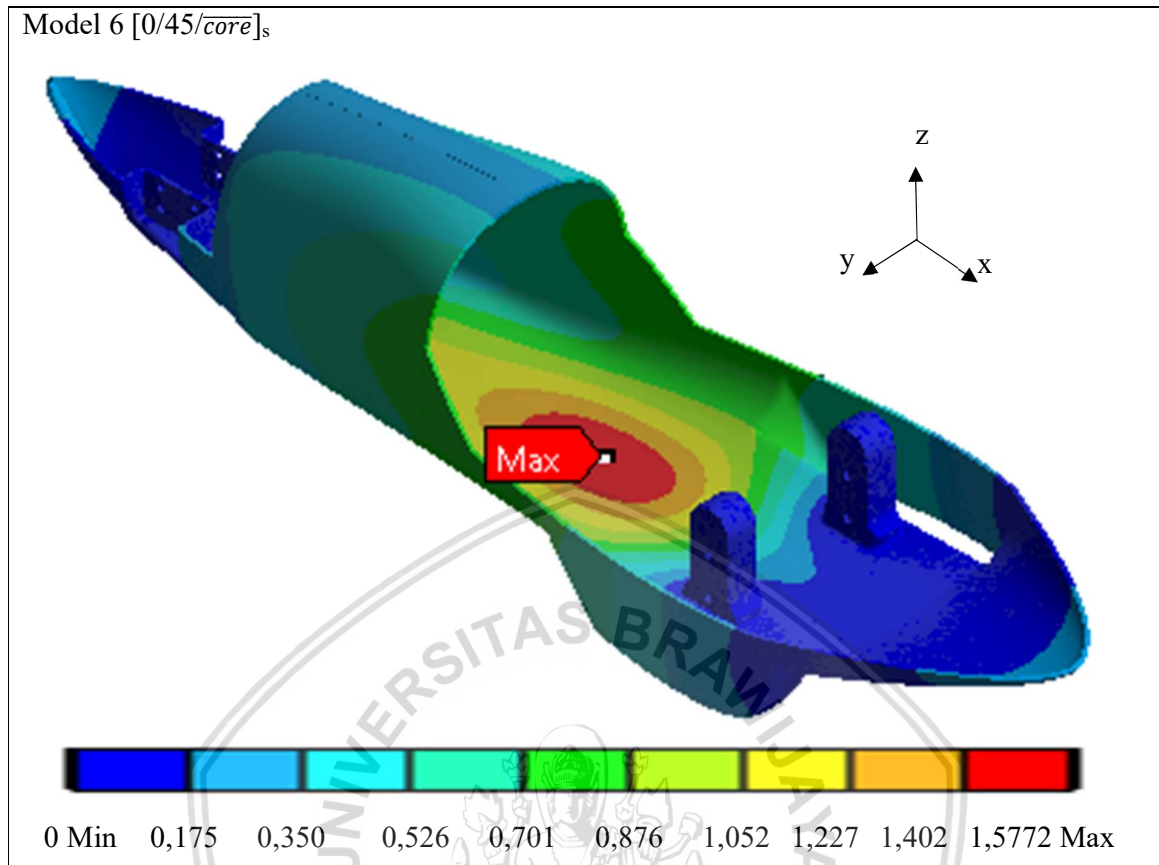


Model 4 [0/0/core/45/45]



Model 5 [45/0/core]_s





Gambar 4.2. Deformasi pada *chassis* pembebanan *vertical bending* dalam satuan millimeter (mm)

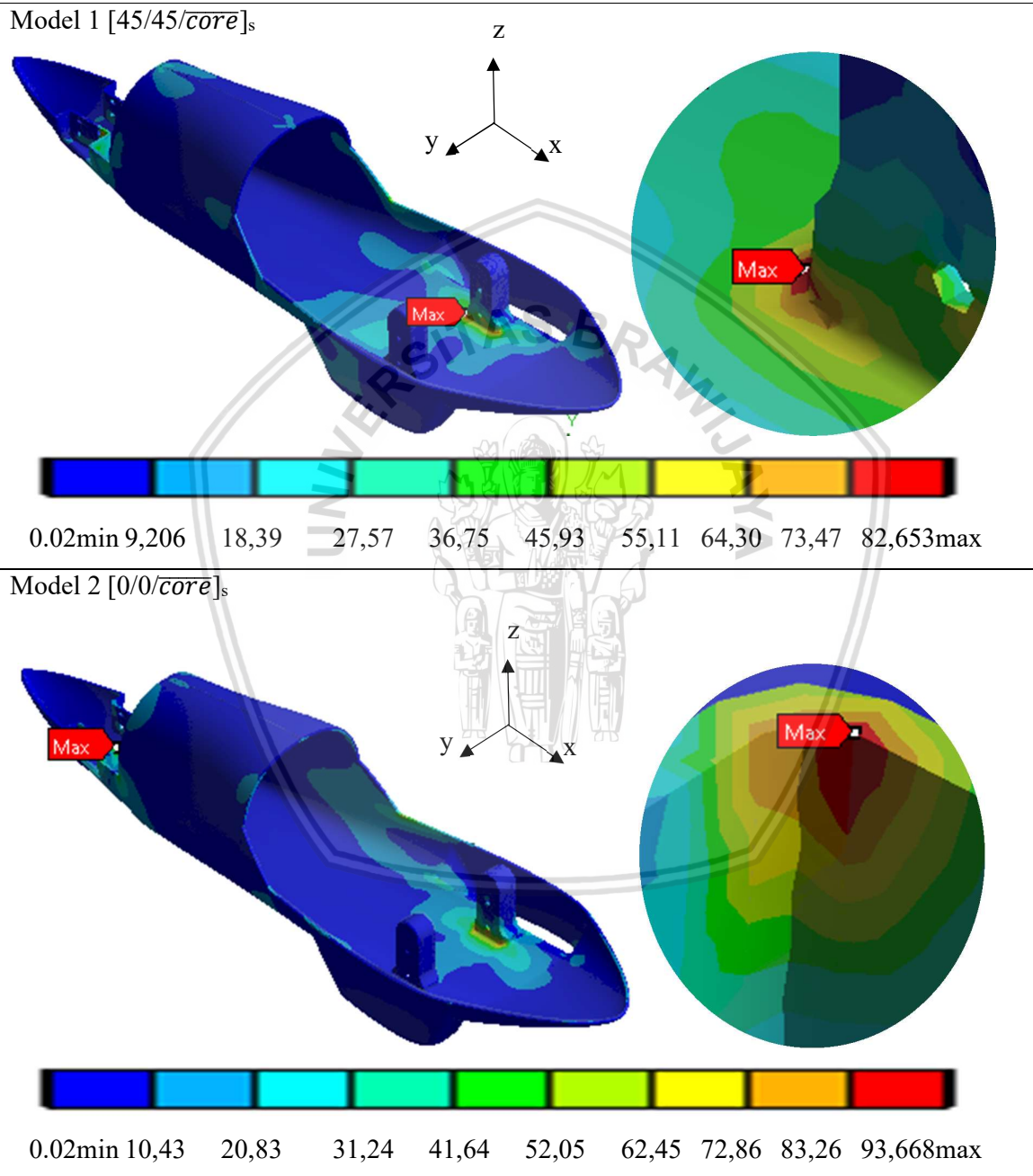
Uji pembebanan *vertical bending* dilakukan agar dapat mengetahui karakteristik struktur *chassis* ketika dikenai gaya yang ditompang pada saat kendaraan dalam keadaan diam.

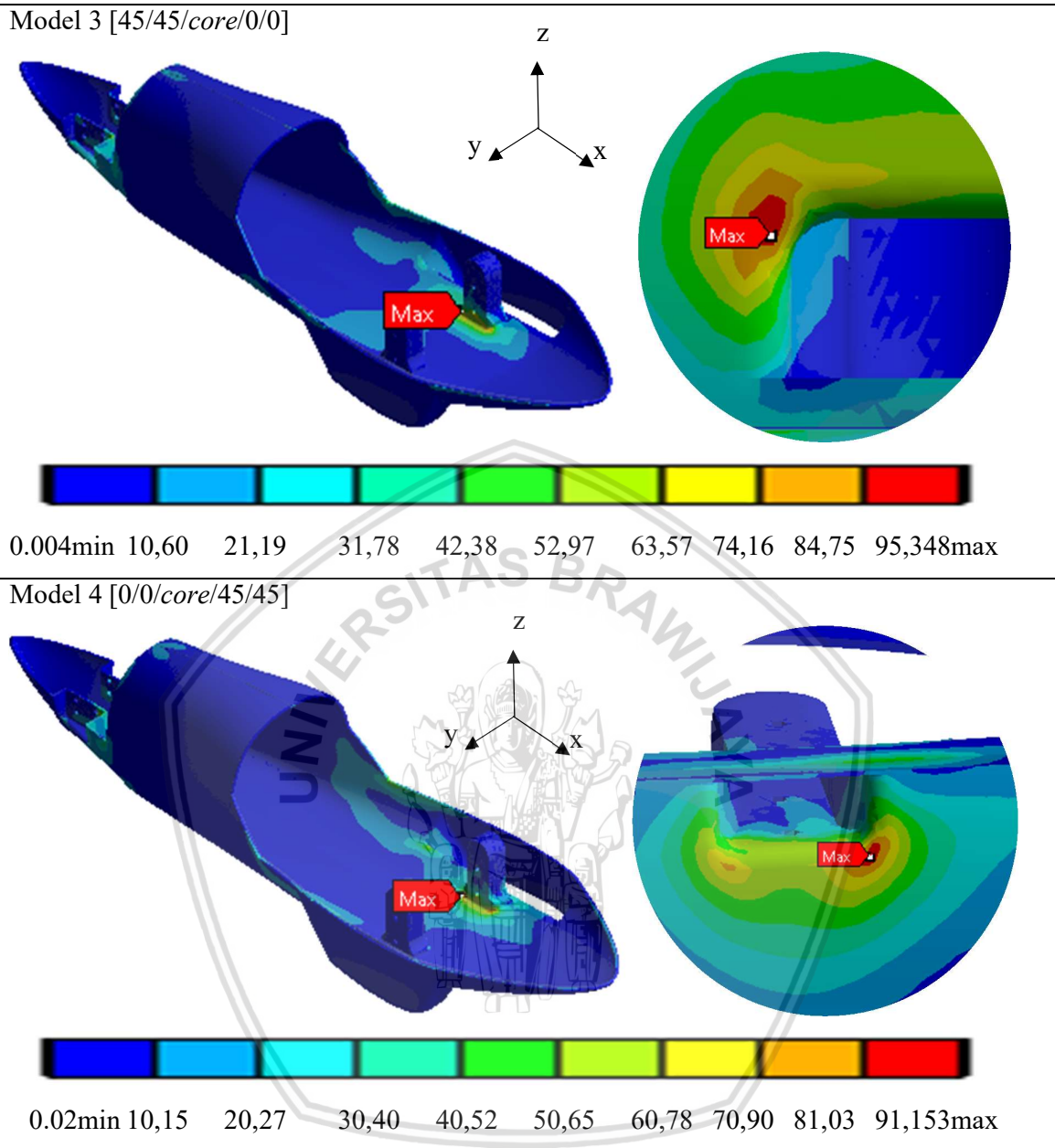
Pada Gambar 4.2 menjelaskan perbandingan deformasi total uji pembebanan *vertical bending* pada setiap model. Deformasi total pada model ke-1 bernilai 2,089 mm, model ke-2 bernilai 1,804 mm, model ke-3 bernilai 1,980 mm, model ke-4 bernilai 1,790 mm, model ke-5 bernilai 1,584 mm dan model ke-6 bernilai 1,577 mm. Pada model ke-1 dengan konfigurasi $[45/45/\overline{core}]_s$ memiliki deformasi paling tinggi dengan nilai 2,089 mm. Sedangkan nilai terendah pada model ke-6 dengan konfigurasi $[0/45/\overline{core}]_s$ dengan nilai 1,577 mm.

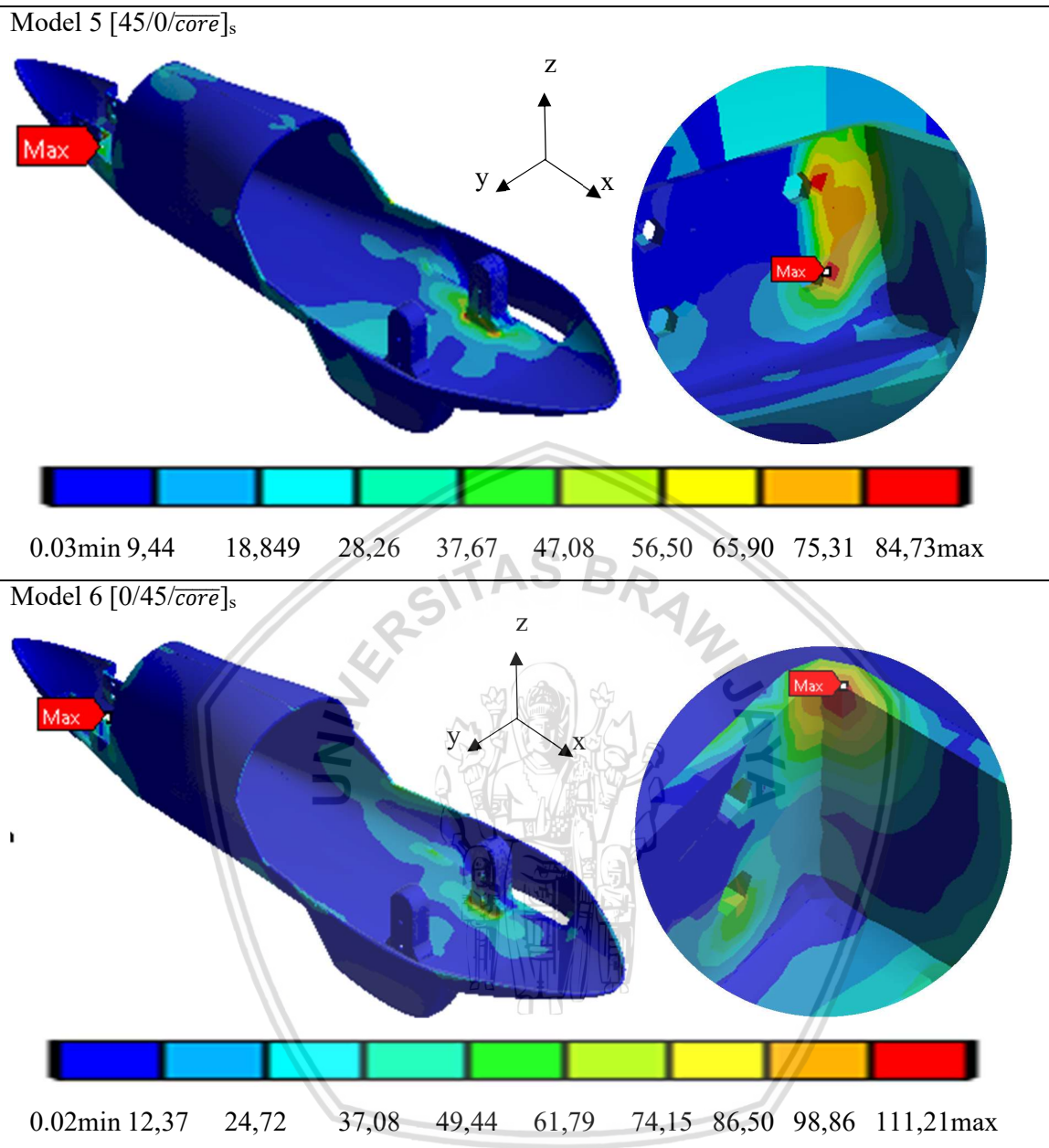
4.1.2 Tegangan pada *Chassis*

Pengujian *torsional* yang dilakukan pada 6 model *chassis* dengan variasi sudut orientasi pada *layer carbon fiber*. Distribusi tegangan pada setiap model secara kasat mata

tampak mirip, posisi dari tegangan maksimal umumnya berada pada permukaan yang meruncing lokasinya disekitar tumpuan. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya konsentrasi tegangan akibat dari perubahan geometri dan permukaan berlubang sehingga terjadi konsentrasi tegangan sesuai dengan dasar teori



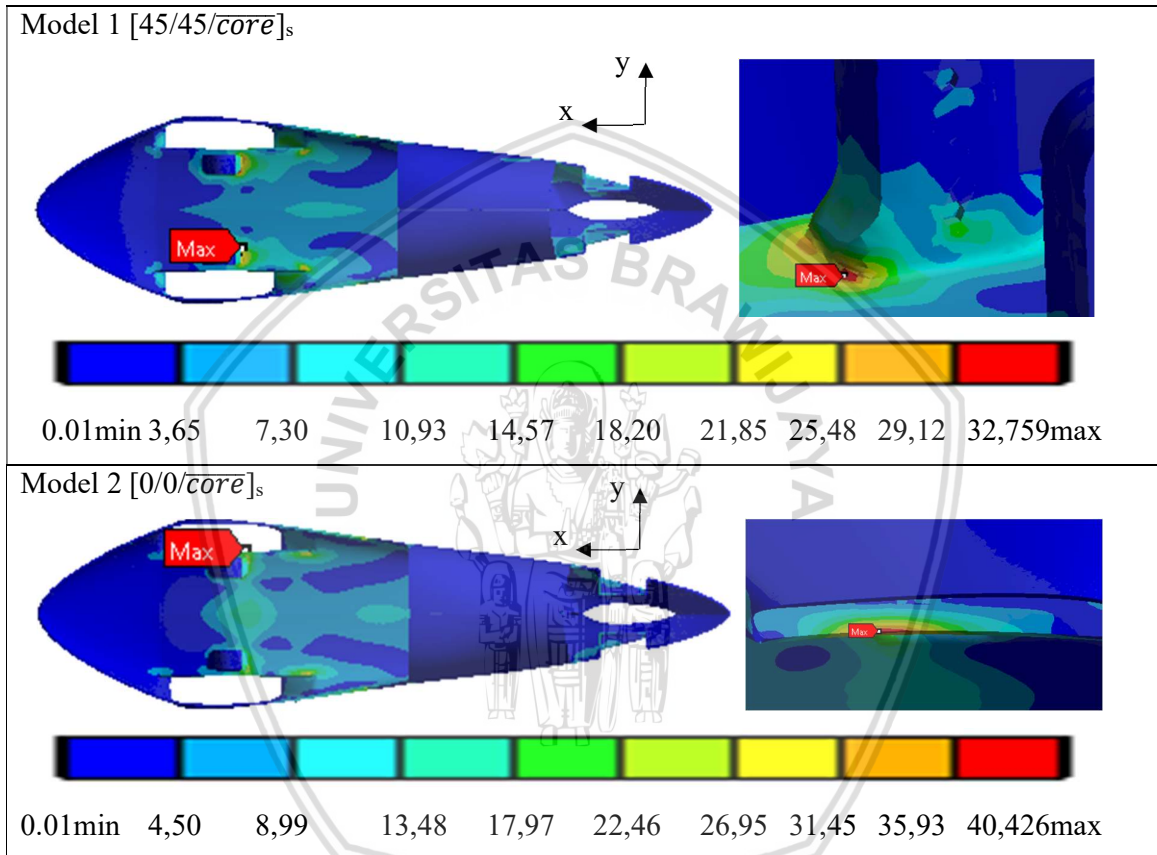




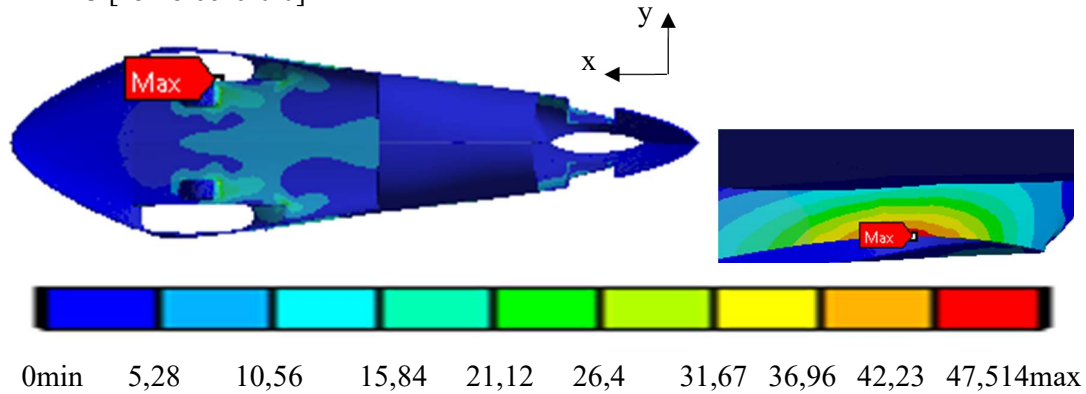
Gambar 4.3. Tegangan pada *chassis* dengan pembebanan *torsional* dalam satuan megapascal (mpa)

Pada Gambar 4.3 menjelaskan perbandingan tegangan pembebanan *torsional* pada setiap model. Tegangan maksimal pada model ke-1 bernilai 82.653 MPa, model ke-2 bernilai 93,668 MPa, model ke-3 bernilai 95,348 MPa, model ke-4 bernilai 91,153 MPa, model ke-5 bernilai 84,730 MPa dan model ke-6 bernilai 111,212 MPa. Pada model ke-6 dengan laminasi $[0/45/\overline{core}]_s$ memiliki tegangan paling tinggi dengan nilai 111,212 MPa. Sedangkan nilai terendah pada model ke-1 dengan laminasi $[45/45/\overline{core}]_s$ dengan nilai 82,653 MPa.

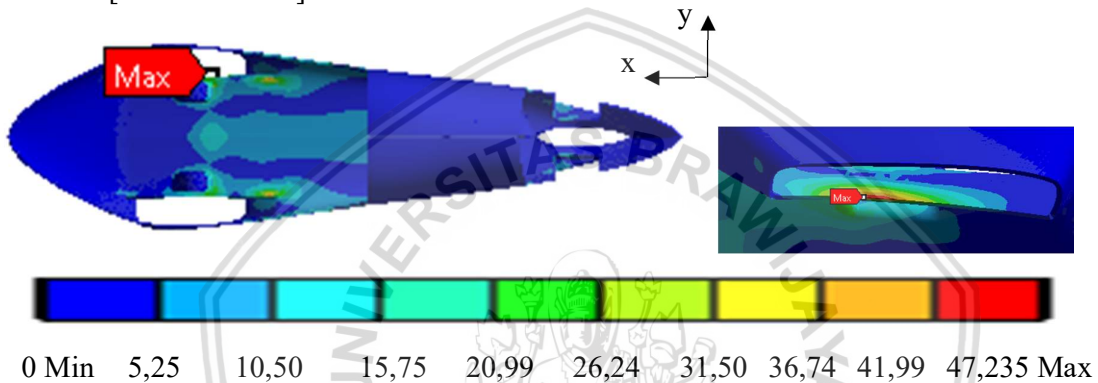
Pengujian *vertical bending* yang dilakukan pada 6 model *chassis* dengan variasi sudut orientasi pada *layer carbon fiber*. Distribusi tegangan pada setiap model memiliki kesamaan dalam hal lokasi yaitu pada sekitar tumpuan. Posisi dari tegangan maksimal umumnya berada pada permukaan yang meruncing dan berlubang. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya konsentrasi tegangan akibat dari perubahan geometri secara mendadak sesuai dengan dasar teori.



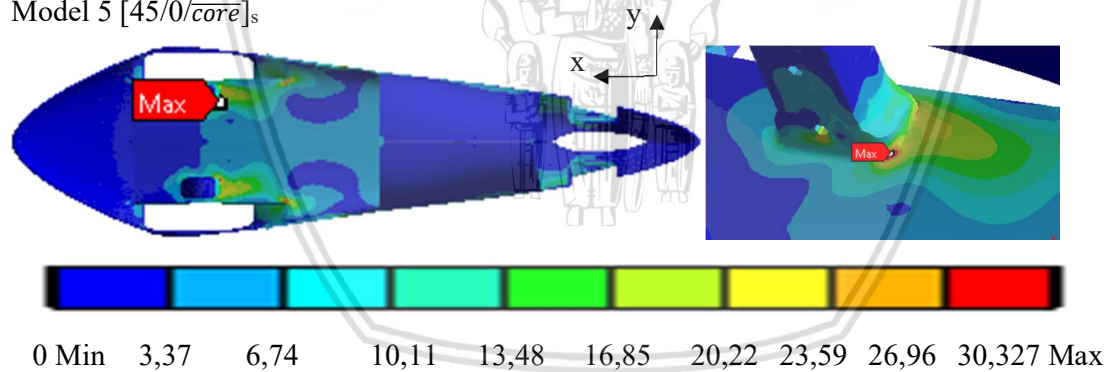
Model 3 [45/45/core/0/0]



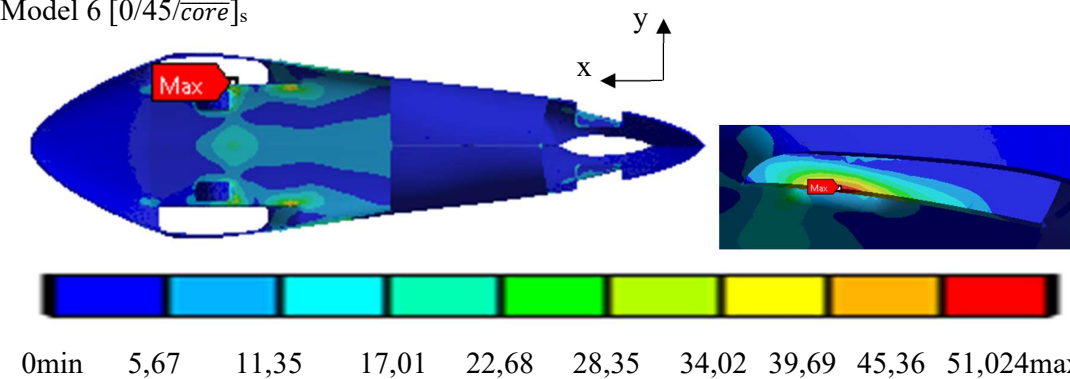
Model 4 [0/0/core/45/45]



Model 5 [45/0/core]_s



Model 6 [0/45/core]_s



Gambar 4.4. Tegangan pada chassis dengan pembebanan vertical bending dalam megapascal (mpa)

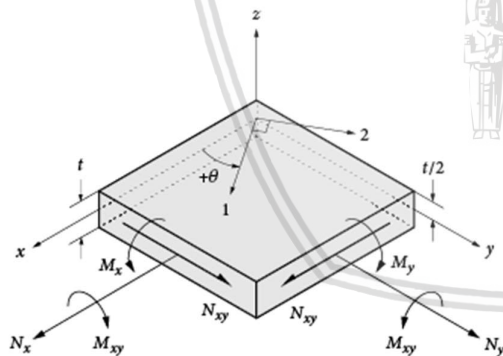
Uji pembebanan *torsional* dilakukan agar dapat mengetahui karakteristik struktur *chassis* ketika dikenai gaya yang ditompang pada saat kendaraan dalam keadaan diam.

Pada Gambar 4.4 menjelaskan perbandingan distribusi tegangan uji pembebanan *vertical bending* pada setiap model. Tegangan maksimal pada model ke-1 bernilai 32,759 MPa, model ke-2 bernilai 40,426 MPa, model ke-3 bernilai 47,514 MPa, model ke-4 bernilai 47,235 MPa, model ke-5 bernilai 30,327 MPa dan model ke-6 bernilai 51,024 MPa. Pada model ke-6 dengan laminasi $[0/45/\overline{core}]_s$ memiliki tegangan paling tinggi dengan nilai 51,024 MPa. Sedangkan nilai terendah pada model ke-5 dengan laminasi $[45/0/\overline{core}]_s$ dengan nilai 30,327 MPa.

4.2. Pembahasan

4.2.1 Validasi Data Matrix Kekakuan Laminasi

Pada material komposit terdapat faktor yang menentukan kekakuan material komposit salah satunya adalah sudut orientasi lamina. Sudut orientasi lamina akan merubah matrix kekakuan suatu material komposit dikarenakan terdapat perubahan sudut terhadap sumbu *principal*-nya dengan sumbu pembebanannya yaitu sumbu x dan sumbu y.



Gambar 4.5. Sudut orientasi lamina

Matrix kekakuan lamina $[Q]$ dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-1)$$

Dimana:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{v_{12}E_2}{1-v_{12}v_{21}} \dots\dots\dots (4-3)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1-v_{12}v_{21}} \dots\dots\dots (4-4)$$

$$Q_{66} = G_{12} \dots\dots\dots (4-5)$$

Dimana :

E_1 = Modulus Young *Longitudinal*

E_2 = Modulus Young *Transverse*

v_{12} = Poisson Ratio bidang 1-2

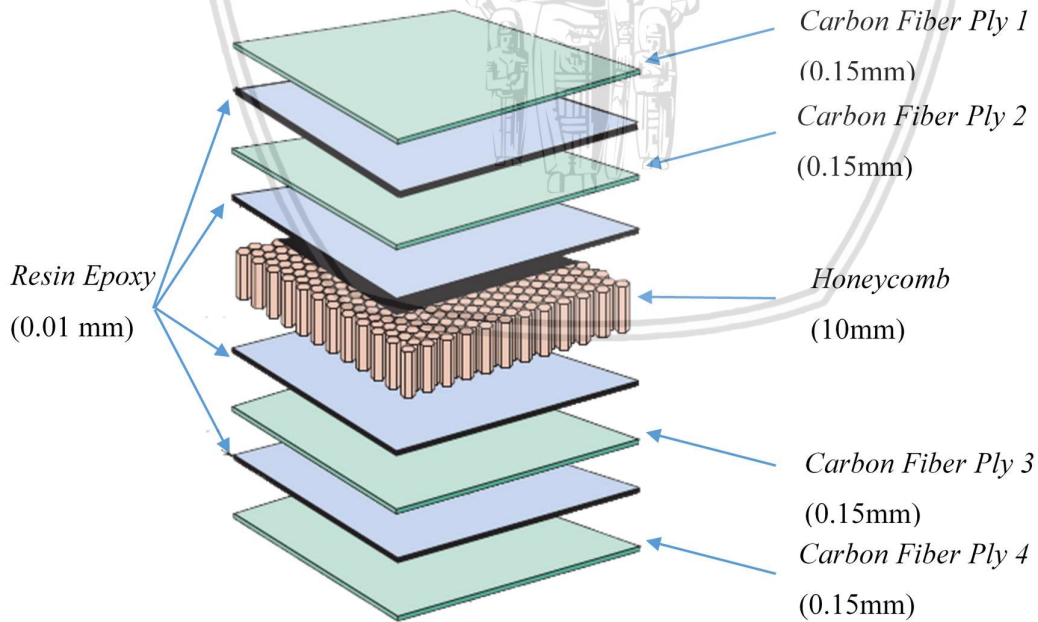
G_{12} = Modulus Geser Bidang 1-2

Pada penelitian terdapat 3 material sehingga terdapat 3 matrix kekakuan lamina:

$$[Q]_{cf} = \begin{bmatrix} 70707.07 & 7070.71 & 0 \\ 7070.71 & 70707.07 & 0 \\ 0 & 0 & 5000.00 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-6)$$

$$[Q]_{resin} = \begin{bmatrix} 3931.62 & 1376.07 & 0 \\ 1376.07 & 3931.62 & 0 \\ 0 & 0 & 1277.80 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-7)$$

$$[Q]_{honeycomb} = \begin{bmatrix} 1.316 & 0.645 & 0 \\ 0.645 & 1.316 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-8)$$



Gambar 4.6. Sandwich composite

Dikarenakan variasi yang dibebaskan adalah sudut orientasi *carbon fiber*, salah satu model yang akan dihitung adalah variasi model 1 $[45/45/\overline{core}]_s$. Maka matrix kekakuan

material *carbon fiber* $[Q]_{cf}$ ditransformasi sebanyak 45° berlawanan arah jarum jam dengan matrix transformasi, sedangkan matrix kekakuan material lain tidak mengalami transformasi. Maka persamaan transformasi matrix kekakuan laminasi $[\bar{Q}]$ sebagai berikut:

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][T] \dots\dots\dots (4-9)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-10)$$

$$[\bar{Q}]_{cf45^\circ} = \begin{bmatrix} 43888.89 & 33888.89 & 0 \\ 33888.89 & 43888.89 & 0 \\ 0 & 0 & 31818.18 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-11)$$

Dari data diatas maka kekakuan laminasi ekstensional $[A]$, kekakuan laminasi kopel $[B]$ dan kekakuan laminasi *bending* $[D]$ atau biasa disebut dengan matriks $[ABD]$. Masing-masing matrix dapat dihitung dengan persamaan:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \dots\dots\dots (4-12)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \dots\dots\dots (4-13)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \dots\dots\dots (4-14)$$

Berikut adalah matrix gabungan $[A]$, $[B]$ dan $[D]$, atau disebut dengan matriks $[ABD]$:

$$[ABD] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-15)$$

Hasil perhitungan matriks ABD dari model 1 $[45/45/\overline{c\overline{o}r\overline{e}}]_s$ adalah:

$$[ABD] = \begin{bmatrix} 26503.76 & 20394.82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 20394.82 & 26503.76 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 19142.02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 706895.27 & 544082.51 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 544082.51 & 706895.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 510772.40 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-16)$$

Dari perhitungan diatas dibandingkan dengan perhitungan matrix kekakuan laminasi pada ANSYS Composite PreqPost (ACP) ditunjukkan pada Gambar 4.7, didapatkan sangat sedikit perbedaan hasil antara perhitungan manual dengan perhitungan ANSYS sehingga aplikasi dapat digunakan untuk mensimulasikan struktur dengan material komposit.

ACP-Pre.acp - ANSYS Composite PrepPost

File View Tools Units Help

Search

ACP - Pre

Models

ACP Model

Material Data

Materials

Fabrics

Stackups

Stackup

Sub Laminate

Element Sets

Edge Sets

Geometry

Laminate Stiffness and Compliance Matrices

Scene.1

i	0	1	2	3	4	5
0	26504	20395	3.2742e-12	0	-3.638e-12	0
1	20395	26504	-3.2742e-12	-3.638e-12	0	0
2	4.3656e-12	-4.3656e-12	19142	0	0	0
3	0	-3.638e-12	0	7.069e+05	5.4408e+05	8.7373e-11
4	-3.638e-12	0	0	5.4408e+05	7.069e+05	-8.7373e-11
5	0	0	0	1.165e-10	-1.165e-10	5.1077e+05
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0

Stiffness Matrix:

Gambar 4.7. Nilai matrik ABD pada software ACP-ANSYS 18.2

4.2.2 Pengaruh Sudut Orientasi pada Laminasi Sandwich Composite

$$[\bar{Q}]_{cf0^\circ} = \begin{bmatrix} 70707.07 & 7070.71 & 0 \\ 7070.71 & 70707.07 & 0 \\ 0 & 0 & 5000.00 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-17)$$

$$[\bar{Q}]_{cf45^\circ} = \begin{bmatrix} 43888.89 & 33888.89 & 0 \\ 33888.89 & 43888.89 & 0 \\ 0 & 0 & 31818.18 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4-18)$$

Terdapat perubahan matriks kekakuan laminasi pada *carbon fiber* ketika diputar 45° berlawanan jarum jam (tertransformasi), terlihat bahwa pada \bar{Q}_{11} dan \bar{Q}_{22} yang merepresentasikan modulus young pada arah sumbu x dan y lebih kecil dibandingkan dengan \bar{Q}_{11} dan \bar{Q}_{22} *carbon fiber* 0° (tanpa transformasi) dan pada \bar{Q}_{66} yang merepresentasikan modulus geser pada bidang x-y lebih besar dibandingkan dengan \bar{Q}_{66} sebelum transformasi. Dapat diketahui bahwa ketika laminasi *carbon fiber* 0° (tidak tertransformasi) mempunyai modulus young relatif lebih besar dibandingkan dengan *carbon fiber* 45° (tertransformasi) sedangkan pada modulus geser *carbon fiber* 0° lebih kecil dibandingkan dengan *carbon fiber* 45° . Dalam kasus ini *carbon fiber* yang digunakan adalah tipe woven dimana $E_1 = E_2$, sehingga modulus young pada sumbu x dan y akan selalu sama.

Dalam penelitian ini menggunakan model dengan variasi sudut orientasi *carbon fiber* yang susunannya berbeda-beda, susunan *carbon fiber* mempengaruhi karakteristik dari material komposit. Hal ini diketahui melalui matriks ABD sesuai dengan persamaan 4-11, 4-12, 4-13 dan 4-14.

Pengaruh matriks ABD terhadap deformasi dijelaskan pada persamaan 4-18:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4-19)$$

Melalui matrix ABD dapat diketahui sudut orientasi lamina *carbon fiber* memiliki pengaruh terhadap deformasi.

Hal yang mempengaruhi tegangan pada lamina, dapat dijelaskan pada persamaan persamaan 4-3:

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k(\{\epsilon^0\} + z\{\kappa\}) \dots\dots\dots (4-20)$$

Dimana :

$\{\sigma\}_k$ = tegangan pada lamina k

$[\bar{Q}]_k$ = transformasi matrix kekakuan lamina

$\{\epsilon^0\}$ = regangan

z = koordinat terluar lamina terhadap sumbu tengah

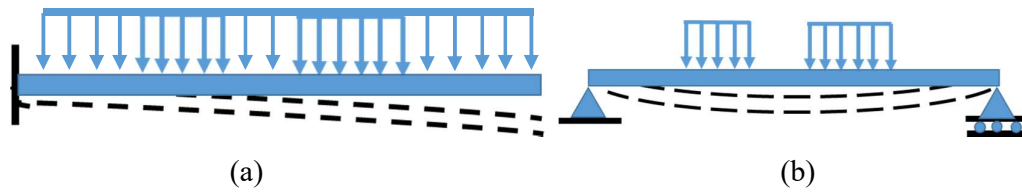
$\{\kappa\}$ = kelengkungan

Sesuai dengan persamaan 4-19 tegangan pada lamina *carbon fiber* dipengaruhi oleh transformasi matrix kekakuan, regangan dan posisi lamina. Menurut persamaan 4-9 dapat diketahui bahwa transformasi pada matriks kekakuan $[Q]$ menghasilkan matriks transformasi kekakuan $[\bar{Q}]$, sehingga dapat disimpulkan bahwa tegangan pada struktur *sandwich* dipengaruhi oleh sudut orientasi lamina *carbon fiber*.

Sebagai pendukung terdapat hasil tegangan pada setiap lamina *carbon* pada *chassis* dan juga pengujian uji tarik yang dilakukan pada material dengan spesimen standar ASTM D3039. Didapatkan pengaruh sudut orientasi dan susunan lamina pada hasil tegangan dan deformasi pada setiap model. Hasil dari tegangan pada setiap lamina carbon terdapat pada **Lampiran 1** dan untuk pengujian spesimen uji tarik terdapat pada **Lampiran 2**.

4.2.3 Lokasi Deformasi dan Tegangan Maksimal

Pada pengujian pembebanan *torsional* seluruh model laminasi mengalami deformasi maksimal pada bagian terluar dari *chassis*. Hal tersebut dikarenakan salah satu tumpuan dibebaskan sehingga struktur akan cenderung terdefleksi maksimal pada ujung tersebut karena tidak ada reaksi gaya yang melawan momen dari pembebanan. Hal tersebut mirip dengan fenomena pada *Cantilever Beam*. Pada pengujian pembebanan *vertical* seluruh model laminasi mengalami deformasi maksimal pada bagian tengah diantara tumpuan dari *chassis*. Hal tersebut dikarenakan tidak ada reaksi gaya yang melawan momen yang terjadi kasus ini sesuai dengan fenomena pada *Simple Beam*.



Gambar 4.8. Ilustrasi deformasi pada *chassis* (a) *cantilever beam*, (b) *simple beam*

Pada tumpuan yang tidak mengalami deformasi terdapat reaksi yang melawan momen dan gaya dari pembebanan. Akibat momen dan gaya reaksi pada tumpuan maka tegangan akan berpusat pada tumpuan. Pola tegangan mengalami ketidakseragaman ketika geometri terdapat lubang, filet, lekukan, ulir atau mengalami perubahan geometri mendadak. Ketidakseragaman geometri menyebabkan tegangan tinggi pada sebagian kecil wilayah tersebut, hal tersebut dikatakan sebagai konsentrasi tegangan (Gere,2004).

4.2.4 Perbandingan Hasil Variasi Model Sudut Orientasi *Carbon fiber*

Perbandingan hasil simulasi dilakukan untuk mendapatkan model yang cocok untuk digunakan pada mobil. Hasil yang akan dibandingkan adalah nilai dari tegangan dan deformasi pada *chassis* serta melihat kegagalan material pada *software*. Pada Tabel 4.1 menunjukkan tegangan dan deformasi pada pembebanan *torsional* dan *vertical bending* dengan variasi sudut orientasi *carbon fiber*.

Tabel 4.1.
Tegangan dan deformasi pada seluruh model

Model	Tegangan (MPa)		Deformasi (mm)	
	<i>Torsional</i>	<i>Vertical bending</i>	<i>Torsional</i>	<i>Vertical bending</i>
Model 1	82.653	32.759	11.154	2.089
Model 2	93.668	40.426	11.495	1.804
Model 3	95.348	47.514	13.723	1.980
Model 4	91.153	47.235	13.325	1.790
Model 5	84.730	30.327	9.875	1.584
Model 6	111.212	51.024	9.867	1.577

Pada Tabel 4.2 didapatkan hasil dari *Inverse reserve factor* (IRF) dari struktur *chassis* dengan pembebanan *torsional* dan *vertical bending*. Nilai dari IRF menunjukkan kegagalan material *orthotropic*. Material dikatakan gagal apabila nilai dari IRF lebih dari 1. Sehingga

nilai IRF harus dibawah 1 agar struktur aman. Nilai IRF diambil dari perhitungan pada elemen dengan membandingkan nilai terbesar dari kriteria kegagalan perbandingan tegangan prisipal dan tegangan maksimal komposit (*maximum stress*) dan perbandingan regangan prisipal dan regangan maksimal komposit (*maximum strain*). Dari hasil tersebut diambil nilai terbesar diantara dua kriteria, hasil perhitungan tersebut dijelaskan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2.

Inverse reserve factor (IRF) pada seluruh model

Model	<i>Inverse Reserve Factor</i>	
	<i>Torsional</i>	<i>Vertical bending</i>
Model 1	0.303	0.128
Model 2	0.203	0.104
Model 3	0.311	0.109
Model 4	0.262	0.110
Model 5	0.204	0.107
Model 6	0.207	0.109

Menurut data dari pengujian dengan pembebanan *torsional* dan *vertical bending* dapat disimpulkan bahwa seluruh model mempunyai nilai IRF dibawah 1 sehingga seluruh model *chassis* mempunyai kriteria aman untuk digunakan.

Menurut data dari pengujian dengan pembebanan *torsional* dapat disimpulkan bahwa model ke-1 mempunyai tegangan paling kecil dan pada model ke-6 mempunyai tegangan paling besar. Menurut data dari pengujian dengan pembebanan *vertical bending* dapat disimpulkan bahwa model ke-5 mempunyai tegangan paling kecil dan pada model ke-6 mempunyai tegangan paling besar. Melihat dari segi tegangan model ke-1 dan model ke-5 menjadi pilihan terbaik dalam pemilihan model *chassis*.

Menurut data dari pengujian pembebanan *torsional* dapat disimpulkan bahwa model ke-3 mempunyai deformasi paling besar dan pada model ke-6 mempunyai deformasi paling kecil. Menurut data dari pengujian pembebanan *vertical bending* dapat disimpulkan bahwa model ke-1 mempunyai deformasi paling besar dan pada model ke-6 mempunyai deformasi paling kecil. Melihat dari segi kekakuan *chassis* dengan model ke-6 memiliki kekakuan terbaik diantara semua model



BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada setiap pengujian sudut orientasi *carbon fiber* memiliki pengaruh terhadap tegangan dan deformasi hal ini disebabkan karena sudut orientasi *carbon fiber* mempengaruhi matriks kekakuan material.
2. Pada pengujian pembebanan *torsional* mendapatkan hasil deformasi total terbesar terdapat pada model 3 dengan susunan laminasi $[45/45/core/0/0]$ dengan nilai 13,925 mm dan hasil deformasi total terkecil terdapat pada model 6 dengan susunan laminasi $[0/45/core]_s$ dengan nilai 11,342 mm. Pada pengujian pembebanan *vertical bending* mendapatkan hasil deformasi total terbesar terdapat pada model 1 dengan susunan laminasi $[45/45/core]_s$ dengan nilai 2,181 mm dan hasil deformasi total terkecil terdapat pada model 6 dengan susunan laminasi $[0/45/core]_s$ dengan nilai 1,764 mm.
3. Pada pengujian pembebanan *torsional* mendapatkan hasil tegangan maksimal terbesar terdapat pada model 3 dengan susunan laminasi $[45/45/core/0/0]$ dengan nilai 94,760 MPa dan hasil tegangan maksimal terkecil terdapat pada model 2 dengan susunan laminasi $[0/0/core]_s$ dengan nilai 89,896 Mpa. Pada pengujian pembebanan *vertical bending* mendapatkan hasil tegangan maksimal terbesar terdapat pada model 6 dengan susunan laminasi $[0/45/core]_s$ dengan nilai 46,014 MPa dan hasil tegangan maksimal terkecil terdapat pada model 5 dengan susunan laminasi $[45/0/core]_s$ dengan nilai 31,002 MPa.
4. Menurut hasil simulasi kegagalan material pada seluruh model nilai *inverse reserve factor* (IRF) dibawah nilai 1 sehingga model tidak menunjukkan kegagalan pada struktur *chassis*. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh model dalam penelitian ini sudah aman.

5.2. Saran

1. Diperlukannya penelitian lebih lanjut secara eksperimental nyata dengan pembuatan *prototype chassis* dari semua model material untuk memvalidasi dan perbandingan hasil penelitian secara simulasi dengan penelitian eksperimental nyata.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut terhadap material komposit yang digunakan secara eksperimental untuk mengetahui sifat mekanik material dikarenakan banyaknya faktor manufaktur yang mempengaruhi sifat mekanik material



DAFTAR PUSTAKA

- Acosta, B., Betancourt, M., Pinheiro, F. (2012). Shell Eco-Marathon 100 % of Final Report. Bachelor Thesis. Unpublished. Florida: Florida International University.
- Bickel, Chad Louis (2017). Optimizing Control of Shell Eco-Marathon Prototype Vehicle to Minimize Fuel Consumption. Master Thesis. Unpublished. California: Faculty of California Polytechnic State University.
- Burt, Charles. Piao, Xianshu. Gaudi, Franklin. Busch, Bryan. Taufik, NFN. Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads. California : California Polytechnic State University.
- Callister, W. D. Jr. (2009). Materials Science and Engineering: An Introduction. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, F. C. (2010). Structural Composite Materials. Ohio: ASM International.
- Dieter, G. E. Jr. (1961). Mechanical Metallurgy. New York: McGraw-Hill.
- Eurenius, C. A., Danielsson, N., Khokar, A., Krane, E., Olofsson, M., Wass, J. (2013). Analysis of Composite Chassis. Bachelor Thesis. Unpublished. Sweden: Chalmers University Of Technology.
- Gere, James M. Mechanical of Materials : Sixth Edition. (2004) Singapura: Thomson Learning
- Gibson, R.F. (2011). Principles Of Composite Material Mechanics. New York: McGraw-Hill.
- Imran, Mohammed. Khan, A.R. Anwar. Megeri, Sadananda. Sadik, Shoaib. (2016). Study of hardness and tensile strength of Aluminium-7075 percentage varying reinforced with graphite and bagasse-ash composites. Cambridge: Elsevier Ltd.
- Irimescu, A. Mihon, L. Pădure, G. (2011). Automotive Transmission Efficiency Measurement Using A Chassis Dynamometer. Jurnal International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 555–559
- Jose, J.P., Malhotra, S.K., Thomas, S., Joseph, K., Goda, K., Sreekala, M.S. (2012). Polymer Composites: Volume 1. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Mat, Mohd Hanif. Ghani, Amir Radzi Ab. (2012). Design and Analysis of 'Eco' Car Chassis. Cambridge: Elsevier Ltd.
- Mathai, A., Kurian, A. P., Jacob, B., K, N. M., Baby, T.R. (2014). Ply Orientation of Carbon fiber Reinforced Aircraft Wing - A Parametric Study. Int. Journal of Engineering Research and Applications. 4(5): 8353-55.
- Miner, Andrew and Jones, Simon, "Design, Testing, Analysis, and Material Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymers" (2016). Rose-Hulman Undergraduate Research Publications. 9.
- More, A., Chavan, C., Patil, N., Ravi, K. (2017). Design, Analysis and Optimization of Space Frame Chassis. Jurnal IJET. 9(2): 1411-1422.
- Njuguna, J. (2016). Lightweight Composite Structures in Transport. Cambridge: Elsevier Ltd.